J.Niard

COURS D'
ÉLECTRICITÉ

électronique

NATHAN TECHNIQUE

J. NIARD
Ancien élève de l'E.N.S.E.T.
Professeur au Lycée Technique de Champagne-sur-Seine

ÉLECTRONIQUE

CLASSES DE

PREMIÈRES
F_2 et F_3

Préparation aux baccalauréats de Techniciens
Options « Électronique » et « Électrotechnique »

NATHAN TECHNIQUE
18, rue Monsieur-le-Prince Paris 6e

COURS D'ÉLECTRICITÉ

Collection J. NIARD

1re F, H	LOIS GÉNÉRALES - COURANT CONTINU édition bleue
	LOIS GÉNÉRALES - COURANT CONTINU édition jaune
1re F_1, F_2, F_3, F_5 T. F_1, F_4, F_5	LOIS GÉNÉRALES - COURANT ALTERNATIF édition bleue
1re F_1, F_2, F_3	LOIS GÉNÉRALES - COURANT ALTERNATIF édition jaune
1re F_2, F_3	ÉLECTRONIQUE nouvelle édition
	ÉLECTRONIQUE édition rouge
T. F_1	ÉLECTRONIQUE
T. F_2	ÉLECTRONIQUE
T. F_3	ÉLECTRONIQUE
T. F_1, F_3	MACHINES ÉLECTRIQUES
T. F_2	MACHINES ÉLECTRIQUES
T. F_2, F_3	CIRCUITS ÉLECTRIQUES
1re F_2, F_3	MESURES ÉLECTRIQUES
T F_2	MESURES ÉLECTRONIQUES
B.T.S.	COMPLÉMENTS D'ÉLECTRICITÉ

AVERTISSEMENT

Cet ouvrage d'électronique s'adresse aux classes de 1re F_2 et 1re F_3 qui préparent respectivement aux Baccalauréats de Techniciens « Électronique » et « Électrotechnique ».

Le nouveau programme y est entièrement traité. Nous avons essayé d'en respecter et l'esprit et la lettre, cependant il ne nous a pas paru possible d'ignorer d'une part l'oscillographe, instrument si précieux pour l'enseignement moderne et, d'autre part, d'abandonner toute indication sur les tubes tétrode et pentode et surtout sur le phanotron puisqu'en classe terminale il faudra parler des redresseurs contrôlés à gaz.

Finalement ce livre est divisé en 16 chapitres dont 13 constituent le programme proprement dit, les trois autres (le 1er, le 15e et le 16e) ont été traités dans un but d'information et pourront simplement être lus.

Le raz de marée des transistors et des diodes à jonction qui a déferlé sur l'électronique a réduit la part des tubes à vide à trois chapitres (sur 13), un pour la diode, et deux pour la triode.

L'étude des transistors commence par le P.N.P., la justification physique en est plus claire et surtout l'adaptation de ses caractéristiques, avec signes moins, à celles du N.P.N. est plus facile que l'opération inverse.

Les 187 exercices et problèmes, dont 118 avec solution ou réponses, aideront à l'assimilation de ce cours. En ce qui concerne les exercices, il est conseillé de les traiter dans l'ordre, les données ou les réponses entre crochets de certains d'entre eux étant nécessaires aux exercices suivants.

J. NIARD.

La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants-droit ou ayants-cause, est illicite » (alinéas 1er de l'article 40).

Cette présentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code Pénal.

© 1971 Masson et Cie, Paris, 1972
Tous droits de traduction, d'adtapation et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays.
Imprimé en France

TABLE DES MATIÈRES

		Pages
1	***Notions sur la stucture de la matière***	1
	Exercices	17
2	***Émissions électroniques dans le vide***	19
3	***Électron dans le vide***	28
	Exercices	37
	Problèmes	38
4	***Oscillographe***	41
	Exercices	55
	Problèmes	56
5	***Courant dans les solides***	59
	Exercices	73
	Problèmes	73
6	***Semi-Conducteur dopé***	76
	Exercices	81
	Problèmes	82
7	***Jonction P-N, diode à jonction***	83
	Exercices	95
8	***Diode à vide***	97
	Exercices	110
	Problèmes	111
9	***Propriétés des diodes***	115
	Exercices	126
	Problèmes	126
10	***Tube triode***	128
	Exercices	140
	Problèmes	141

11 | **Fonctionnement en amplificateur du tube triode** 144
Exercices 160
Problèmes 161

12 | **Le transistor** 166
Exercices 180

13 | **Le transistor PNP en émetteur commun** 182
Exercices 198
Problèmes 199

14 | **Amplification par transistor. Montage émetteur commun** 201
Exercices 209
Problèmes 210

15 | **Tétrode-Pentode** 213
Exercices 223

16 | **Phanotron (Diode à gaz)** 225
Exercices 234
Problèmes 235

TABLEAU DES NUMÉROS ET DES MASSES ATOMIQUES

Nom	Symbole	Z	A	Nom	Symbole	Z	A
Actinium	Ac	89	227	Mendelevium	Md	101	256
Aluminium	Al	13	27	Mercure	Hg	80	201
Américium	Am	95	243	Molybdène	Mo	42	96
Antimoine	Sb	51	122	Néodyme	Nd	60	144
Argent	Ag	47	108	Néon	Ne	10	20
Argon	Ar	18	40	Neptunium	Np	93	237
Arsenic	As	33	75	Nickel	Ni	28	59
Astate	At	85	210	Niobium	Nb	41	93
Azote	N	7	14	Nobélium	No	102	254
Baryum	Ba	56	137	Or	Au	79	197
Berkelium	Bk	97	249	Osmium	Os	76	190
Béryllium	Be	4	9	Oxygène	O	8	16
Bismuth	Bi	83	209	Palladium	Pd	46	106
Bore	B	5	11	Phosphore	P	15	31
Brome	Br	35	80	Platine	Pt	78	195
Cadmium	Cd	48	112	Plomb	Pb	82	207
Calcium	Ca	20	40	Plutonium	Pu	94	242
Californium	Cf	98	251	Polonium	Po	84	210
Carbone	C	6	12	Potassium	K	19	39
Cérium	Ce	58	140	Praséodyme	Pr	59	141
Césium	Cs	55	133	Prométhéum	Pm	61	147
Chlore	Cl	17	35	Protoactinium	Pa	91	231
Chrome	Cr	24	52	Radium	Ra	88	226
Cobalt	Co	27	59	Radon	Rn	86	222
Cuivre	Cu	29	64	Rhénium	Re	75	185
Curium	Cm	96	247	Rhodium	Rh	45	103
Dysprosium	Dy	66	162	Rubidium	Rb	37	85
Einsteinium	Es	99	254	Ruthénium	Ru	44	101
Erbium	Er	68	167	Samarium	Sm	62	150
Étain	Sn	50	119	Scandium	Sc	21	45
Europium	Eu	63	152	Sélénium	Se	34	79
Fer	Fe	26	56	Silicium	Si	14	28
Fermium	Fm	100	253	Sodium	Na	11	23
Fluor	F	9	19	Soufre	S	16	32
Francium	Fr	87	223	Strontium	Sr	38	88
Gadolinium	Gd	64	157	Tantale	Ta	73	181
Gallium	Ga	31	70	Technétium	Tc	43	99
Germanium	Ge	32	73	Tellure	Te	52	128
Hafnium	Hf	72	178	Terbium	Tb	65	159
Hélium	He	2	4	Thallium	Tl	81	204
Holmium	Ho	67	165	Thorium	Th	90	232
Hydrogène	H	1	1	Thulium	Tm	69	169
Indium	In	49	115	Titane	Ti	22	48
Iode	I	53	127	Tungstène	W	74	184
Iridium	Ir	77	192	Uranium	U	92	238
Krypton	Kr	36	84	Vanadium	V	23	51
Lanthane	La	57	139	Xénon	Xe	54	131
Lawrentium	Lw	103	257	Ytterbium	Yb	70	173
Lithium	Li	3	7	Yttrium	Y	39	89
Lutétium	Lu	71	175	Zinc	Zn	30	65
Magnésium	Mg	12	24	Zirconium	Zr	40	91
Manganèse	Mn	25	55				

CLASSIFICATION PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

Groupes →		I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII			0
Périodes	Niveau externe	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B				
1	K	$^{1}_{1}H$																	$^{4}_{2}He$
2	L	$^{7}_{3}Li$		$^{9}_{4}Be$			$^{11}_{5}B$		$^{12}_{6}C$		$^{14}_{7}N$		$^{16}_{8}O$		$^{19}_{9}F$				$^{20}_{10}Ne$
3	M	$^{23}_{11}Na$		$^{24}_{12}Mg$			$^{27}_{13}Al$		$^{28}_{14}Si$		$^{31}_{15}P$		$^{32}_{16}S$		$^{35}_{17}Cl$				$^{40}_{18}Ar$
4	N	$^{39}_{19}K$	$^{64}_{29}Cu$	$^{40}_{20}Ca$	$^{65}_{30}Zn$	$^{45}_{21}Sc$	$^{70}_{31}Ga$	$^{48}_{22}Ti$	$^{73}_{32}Ge$	$^{51}_{23}V$	$^{75}_{33}As$	$^{52}_{24}Cr$	$^{79}_{34}Se$	$^{55}_{25}Mn$	$^{80}_{35}Br$	$^{56}_{26}Fe$	$^{59}_{27}Co$	$^{59}_{28}Ni$	$^{84}_{36}Kr$
5	O	$^{85}_{37}Rb$	$^{108}_{47}Ag$	$^{88}_{38}Sr$	$^{112}_{48}Cd$	$^{89}_{39}Y$	$^{115}_{49}In$	$^{91}_{40}Zr$	$^{119}_{50}Sn$	$^{93}_{41}Nb$	$^{122}_{51}Sb$	$^{96}_{42}Mo$	$^{128}_{52}Te$	$^{99}_{43}Tc$	$^{127}_{53}I$	$^{101}_{44}Ru$	$^{103}_{45}Rh$	$^{106}_{46}Pd$	$^{131}_{54}Xe$
6	P	$^{133}_{55}Cs$	$^{197}_{79}Au$	$^{137}_{56}Ba$	$^{201}_{80}Hg$	57 à 71	$^{204}_{81}Tl$	$^{178}_{72}Hf$	$^{207}_{82}Pb$	$^{181}_{73}Ta$	$^{209}_{83}Bi$	$^{184}_{74}W$	$^{210}_{84}Po$	$^{185}_{75}Re$	$^{210}_{85}At$	$^{190}_{76}Os$	$^{192}_{77}Ir$	$^{195}_{78}Pt$	$^{222}_{86}Rn$
7	Q	$^{223}_{87}Fr$		$^{226}_{88}Ra$		89 à 103													

A → 28
symbole → Si
Z → 14

Case 6, colonne III A : 57 à 71 Lanthanides (terres rares) La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu.

Case 7, colonne III A : 89 à 103, Actinides et transuraniens, Ac, Th, Pa, U, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Kd, No, Lw.

1

NOTIONS SUR LA STRUCTURE DE LA MATIÈRE

I. — MOLÉCULES

1. *Notions de molécule.*

1° **Définition.** — La molécule est la plus petite partie d'un corps pur qui puisse exister à l'état libre. Fractionner une molécule, c'est détruire le corps. Toutes les molécules d'un même corps pur sont identiques.

2° **Constitution de la molécule.** — La molécule est formée d'un ou plusieurs atomes.

a) *Corps simples.* — Les atomes de la molécule d'un corps simple sont tous identiques.

— *Corps simples monoatomiques (molécule = atome):* néon (Ne), argon (A), mercure à l'état de vapeur (Hg).

— *Corps simples diatomiques:* hydrogène (H_2), azote (N_2), oxygène (O_2).

— *Corps simple triatomique:* ozone (O_3).

b) *Corps composés.* — Les atomes de la molécule d'un corps composé ne sont pas tous identiques.

Exemples : eau (H_2O), soude (NaOH), acide sulfurique (H_2SO_4).

3° **La molécule d'un corps pur n'est pas toujours définie.** — Il en est ainsi de nombreux corps solides à structure cristalline.

a) *Corps simples.* — Fer (Fe), germanium (Ge), silicium (Si).

Dans le fer α, par exemple, les atomes se trouvent placés aux sommets de cubes imbriqués entre eux (fig. 1). Chaque sommet d'un cube se trouve au centre d'un cube voisin (« cube centré »).

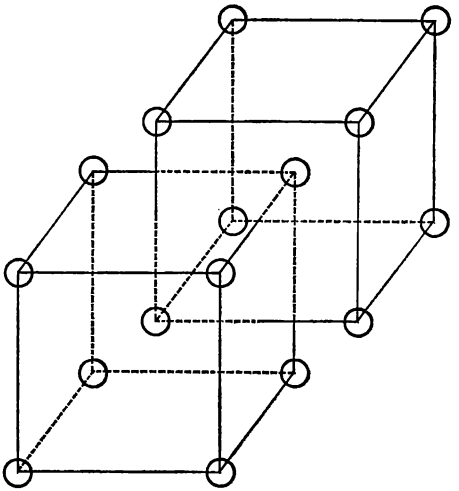


Fig. 1. — *Arrangement des atomes dans le fer.*

b) *Corps composés.* — Le chlorure de sodium (sel de cuisine) est formé d'ions de chlore (Cl^-) et d'ions sodium (Na^+) alternés (fig. 2). Un atome de chlore n'est pas spécialement lié à l'un des six atomes de sodium qui l'entourent. La formule NaCl n'a pour but que de représenter commodément la composition du corps.

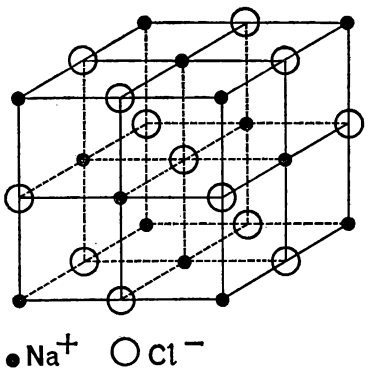


Fig. 2. — *Arrangement des ions dans le chlorure de sodium.*

c) Les électrolytes en solution aqueuse sont, au moins partiellement, dissociés en ions :

soude (Na^+, OH^-), acide chlorhydrique (H^+, Cl^-).

2. *Les molécules sont extrêmement petites.*

1° Nombre d'Avogadro. — La molécule a une petitesse qui échappe à notre entendement. Une réaction chimique portant sur des fractions de milligramme fait intervenir une quantité considérable de molécules : des milliards de milliards. Pour rendre les calculs plus pratiques, les chimistes ont l'habitude de compter en moles :

— **La mole est une quantité de matière correspondant à $N = 6\times10^{23}$ molécules réelles du corps considéré; N est le nombre d'Avogadro,** c'est un nombre énorme. Pour s'en donner une idée prenons un exemple frappant : si l'on mettait en file les 6×10^{23} molécules contenues dans une mole d'eau (18 grammes) on pourrait couvrir 600 000 fois les 380 000 km séparant la terre de la lune.

2° **Masse d'une mole.** — Elle est donnée en grammes par la somme des masses atomiques des atomes qui composent la molécule.

EXEMPLES : $H_2O = 2\times1+16 = 18$ g.
$H_2SO_4 = 2\times1+32+4\times16 = 98$ g

On trouvera page VII un tableau des masses atomiques.

3° **Masse d'une molécule.** — On l'obtient en divisant par **N** la masse d'une mole.

Pour l'eau : $m = \dfrac{18}{6\times10^{23}} = 3\times10^{-23}$ g

Pour l'hydrogène : $m = \dfrac{2}{6\times10^{23}} = 0{,}33\times10^{-23}$ g

Ce sont des masses si faibles qu'il faut des milliards de milliards de molécules pour faire pencher les balances les plus sensibles.

4° **Dimensions d'une molécule.** — Calculons celles d'une molécule d'eau, pour simplifier (nous ne cherchons qu'un ordre de grandeur) nous supposons que les molécules sont sphériques et qu'elles occupent la totalité du volume :

— *Volume d'une molécule:* 18 g occupent 18 cm^3 donc

$$v = \frac{18}{6\times10^{23}} = 3\times10^{-23}\ cm^3$$

— *Rayon d'une molécule:* $v = \dfrac{4}{3}\pi r^3$ d'où

$$r = \sqrt[3]{\frac{3v}{4\pi}} = \sqrt[3]{0{,}717\times10^{-23}} = \sqrt[3]{7{,}17\times10^{-24}} = 1{,}93\times10^{-8}\,cm \simeq 2\times10^{-8}\,cm$$

soit en mètre : $r = 2\times10^{-10}$ m et le diamètre est $d_a = 4\times10^{-10}$ m.

De telles dimensions s'expriment plus commodément en **nanomètres (nm)** ou **en picomètres (pm)** [1], rappelons :

$$1\ nm = 10^{-9}\ m \quad 1\ pm = 10^{-12}\ m$$

On a donc pour l'eau $d_a = 400$ pm

(1) On utilise encore l'angström (Å) : $1\ Å = 10^{-10}\ m = 100$ pm.

REMARQUE. — La molécule étant comme l'atome, essentiellement formée de vide (§ 4), le volume et le diamètre ainsi calculés ne sont pas ceux de la matière. On peut dire qu'il s'agit du **volume d'encombrement** et du **diamètre apparent.**

5° Quelques diamètres apparents de molécules gazeuses.

GAZ	FORMULE	MASSE MOLÉCULAIRE (en g)	d_a en pm
Hydrogène	H_2	2	274
Hélium.	He	4	216
Azote	N_2	28	374
Oxygène	O_2	32	360
Néon	Ne	20	258
Argon	Ar	40	360
Krypton	Kr	84	414
Xénon	Xe	131	486
Mercure	Hg	201	624

3. *Théorie cinétique des gaz. L'agitation moléculaire.*

1° Structure des gaz. — *a*) Tous les corps simples ont à l'état gazeux une structure moléculaire. Leurs molécules sont le plus souvent diatomiques (H_2, N_2, O_2) ou monoatomiques comme les gaz rares de l'air (hélium, argon, néon) et les vapeurs métalliques (fer, mercure).

b) A même température et même pression, un volume donné d'un gaz contient toujours le **même nombre de molécules** quelle que soit la **nature de ce gaz.** En particulier, à la température de 0 °C et à la pression de 1 atmosphère, un volume de **22,4 *l*** contient $\mathbf{6 \times 10^{23}}$ **molécules;** 22,4 *l* est le volume « normal » d'une mole gazeuse.

2° Occupation de l'espace. — Dans les solides et dans les liquides les molécules sont « tassées » les unes contre les autres et occupent la presque totalité du volume : c'est la raison pour laquelle les solides et les liquides sont pratiquement incompressibles.

Dans les gaz au contraire, les molécules n'occupent qu'une faible partie de l'espace disponible, à peine 1/1 000 :

— d'une part, il est possible de les rapprocher les unes des autres : les gaz sont compressibles;

— d'autre part, les molécules ont de la place pour circuler : elles sont libres de se déplacer en tout sens.

3° **L'agitation moléculaire.** — Les molécules d'un gaz sont animées de mouvements incessants et désordonnés. Elles se déplacent en ligne droite jusqu'à ce qu'elles se heurtent soit à d'autres molécules, soit à une paroi du récipient qui les contient. Ces chocs sont parfaitement élastiques et se font sans dissipation d'énergie. La trajectoire d'une molécule est finalement une ligne brisée (fig. 3).

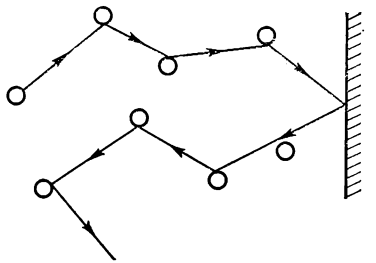


Fig. 3. — *Trajectoire d'une molécule gazeuse.*

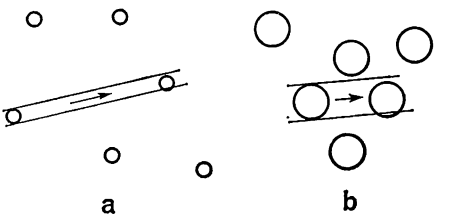


Fig. 4. — *Si les molécules sont plus grosses et plus rapprochées, il y a plus de chocs* (cas b).

4° **Libre parcours moyen (L.P.M.).** — Une molécule en se déplaçant va heurter d'autres molécules. La probabilité d'un choc est d'autant plus grande que la pression est plus élevée (donc les molécules plus rapprochées) et que les molécules sont plus grosses. Inversement le parcours pouvant être réalisé avant un choc (L.P.M.) est d'autant plus petit que la pression est plus élevée et les molécules plus grosses (fig. 4).

On démontre que le libre parcours moyen est donné par la formule :

$$l = \frac{1}{\pi \sqrt{2} n d_a^2}$$

où d_a est le diamètre apparent de la molécule et n le nombre de molécules par mètre cube..

Nous donnons un tableau de correspondance à 0 °C, entre l et la pression p pour l'azote soit à peu de choses près pour l'air (80 % d'azote). Rappelons que $d_a = 374$ pm.

p (mm de Hg) .	760	1	10^{-2}	10^{-4}	10^{-6}
n(molécules /m^3)	268×10^{23}	354×10^{20}	354×10^{18}	354×10^{16}	354×10^{14}
l (m)	6×10^{-8}	$45{,}6\times10^{-6}$	$45{,}6\times10^{-4}$	$45{,}6\times10^{-2}$	45,6
l	0,06 μm	45,6 μm	4,56 mm	45,6 cm	45,6 m

EXEMPLE DE CALCUL. — A la pression atmosphérique et à 0 °C, il y a 6×10^{23} molécules dans 22,4 l soit dans 1 m^3 (1 000 l)

$$n = \frac{6\times10^{23}\times1000}{22{,}4} = 268\times10^{23}$$

$$l = \frac{1}{\pi\sqrt{2}\times268\times10^{23}\times(374\times10^{-12})^2} = 6\times10^{-8}\text{ m}$$

5° **Le vide.** — Il est impossible de réaliser le vide parfait (absence totale de molécules) dans une enceinte. Dans les tubes « à vide » la pression est de l'ordre de 10^{-6} mm de mercure, dans 1 mm^3 il reste encore 354×10^5 molécules, plus de 35 millions! **Le vide approximatif que l'on sait réaliser correspond non à l'absence de molécules mais à la suppression presque totale de chocs entre molécules;** à la pression de 10^{-6} mm de mercure le L.P.M. d'une molécule est de 45 m, il en résulte qu'un parcours de quelques centimètres est effectué sans chocs par la plupart des molécules. Notons tout de suite qu'un électron étant beaucoup plus petit qu'une molécule, *sa probabilité de choc dans un gaz sera encore plus réduite,* on peut dire que dans un tube à vide, l'électron se déplace librement, sans choc. Il pourra ainsi atteindre des vitesses très élevées et ne produira pas d'effet joule.

→ UN TUBE ÉLECTRONIQUE EST DIT « A VIDE » LORSQU'UNE PARTICULE (molécule, électron ou autre) PEUT LE TRAVERSER SANS CHOC.

II. — L'ATOME

4. *Constitution de l'atome.*

1° **Définition.** — L'atome est la plus petite partie d'un élément qui puisse entrer en combinaison pour former une molécule. Détruire l'atome, c'est détruire l'élément. Tous les atomes d'un même élément sont identiques.

REMARQUE. — Dans les réactions chimiques classiques, l'atome est indestructible et « inusable ». On sait que les réactions nucléaires (dans les réacteurs et les bombes atomiques) sont capables de détruire l'atome ou de le modifier.

2° **Mole d'atomes** (1). — Une mole d'atomes est une quantité arbitraire contenant $N = 6 \times 10^{23}$ atomes réels.

La masse en grammes d'une mole d'atomes est donnée par sa masse atomique A (p. VII).

EXEMPLES : C = 12, H = 1, O = 16, Si = 28.

La masse d'un atome réel s'obtient en divisant A par N.

EXEMPLE : pour l'hydrogène,

$$m' = \frac{1}{6 \times 10^{23}} = 1{,}67 \times 10^{-24} \text{ g} = 1{,}67 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

3° **Constituants de l'atome.** — Les trois principaux constituants de l'atome sont :

Le PROTON (P), le NEUTRON (N) et l'ÉLECTRON (e)

a) *Les masses.* — Le proton et le neutron ont la même masse, sensiblement celle de l'atome d'hydrogène : $m' = 1{,}67 \times 10^{-27}$ kg

La masse de l'électron est : $m \simeq \frac{m'}{1\,840}$ soit

$$m = \frac{1{,}67 \times 10^{-27}}{1\,840} = 0{,}91 \times 10^{-30} \text{ kg}$$

On pourra éventuellement la négliger devant m'.

(1) Autrefois on disait « atome-gramme ».

b) *Les charges électriques.* — Le neutron est neutre. Le proton porte une charge positive + *e* et l'électron une charge négative de même valeur absolue notée —*e* avec :

$$\textbf{(1)} \qquad \boxed{e = 1{,}6 \times 10^{-19}\ \text{C}}$$

c) *Les quantités.* — Le nombre **Z** de protons est égal au nombre d'électrons : la charge électrique totale d'un atome est donc :

Z fois (*e*) + Z fois (— *e*) = 0.

« L'atome est électriquement neutre »

Z est appelé numéro atomique, il permet de classer les 103 éléments connus [1] dans l'ordre croissant de leur nombre d'électrons. Le nombre **Y** de neutrons est, sauf pour l'hydrogène, au moins égal au nombre de protons.

$$Y \geqslant Z \qquad \text{(sauf pour } Z = 1\text{)}$$

EXEMPLES : H (1P, 0N, 1e); C (6P, 6N, 6e);

Al (13P, 14N, 13e), Cu (29P, 35N, 29e); Hg (80P, 121N, 80e).

d) *Masse atomique (A).* — La masse des électrons étant négligeable, la masse de l'atome est due aux protons et aux neutrons :

$$A = Y + Z$$

REMARQUE. — Les éléments ont rarement une masse atomique entière bien que Y + Z soit nécessairement entier, cela est dû, en partie, au fait que ces éléments sont en réalité des mélanges en proportions rigoureusement constantes de plusieurs **isotopes** [2].

Par exemple le chlore Cl = 35,5 est formé pour 3/4 de chlore de masse 35 (17 P, 18 N) et 1/4 de chlore de masse 37 (17 P, 20 N).

4° **Le noyau atomique.** — Il est constitué par les neutrons et les protons, toute la masse de l'atome y est donc pratiquement concentrée. Son volume étant extrêmement réduit par rapport au volume d'encombrement de l'atome, sa masse volumique est très grande; le noyau est très « dense ».

EXEMPLE. — Le noyau d'hydrogène (1 proton).

masse : $m' = 1{,}67 \times 10^{-27}$ kg

(1) Le 104e et le 105e viennent d'être découverts.

(2) Les isotopes d'un même élément ont les mêmes propriétés chimiques et le même Z, seul Y (donc A) est différent.

rayon : $r = 0{,}75 \times 10^{-15}$ m

volume (sphère) : $v = \frac{4\pi r^3}{3} = \frac{4\pi \times 0{,}75^3 \times 10^{-45}}{3} = 1{,}76 \times 10^{-45}$ m^3

masse volumique : $\mu = \frac{m'}{v} = \frac{1{,}67 \times 10^{-27}}{1{,}76 \times 10^{-45}} \simeq 0{,}95 \times 10^{18}$ kg/m^3.

Comparons à la masse volumique de l'eau : $\mu_0 = 1\,000$ kg/m^3, nous obtenons une densité phénoménale :

$$d = \frac{\mu}{\mu_0} = 0{,}95 \times 10^{15}$$

Avec cette densité 1 mm^3 ($= 10^{-9}$ m^3) de noyaux atomiques d'eau aurait une masse de :

$$M = 0{,}95 \times 10^{18} \times 10^{-9} = 0{,}95 \times 10^9 \text{ kg} = 950\,000 \text{ tonnes}$$

Ces valeurs sont à peine croyables. On imaginera sans peine le pouvoir de pénétration de projectiles aussi denses et on s'expliquera facilement que pour arrêter les neutrons on soit obligé de construire des murs de 1 m d'épaisseur (réacteurs atomiques).

5° **Le nuage électronique.** — Les électrons gravitent autour du noyau à une distance relativement énorme puisque le rayon de la trajectoire la plus petite (hydrogène) est R = 53,3 pm = $53{,}3 \times 10^{-12}$ m, Le rapport des deux rayons est :

$$\frac{\text{trajectoire}}{\text{noyau}} = \frac{R}{r} = \frac{53{,}3 \times 10^{-12}}{0{,}75 \times 10^{-15}} \simeq 70\,000$$

Pour se donner une idée représentons le noyau par un ballon de football de 12 cm de rayon, pour respecter les proportions l'électron devrait graviter sur une circonférence de :

$$R = 70\,000 \times 12 = 840\,000 \text{ cm} = 8{,}4 \text{ km}$$

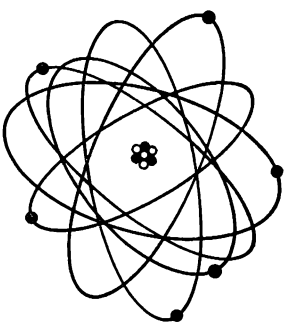


Fig. 5. — *Noyau et orbites électroniques.*

6° **Entre le noyau et les électrons il n'y a rien.** — C'est le *vide parfait*, la structure d'un atome est donc très lacunaire (fig. 5).

Le diamètre apparent de l'atome est celui de la trajectoire de l'électron le plus extérieur. Quand la molécule est monoatomique il se confond avec le diamètre apparent de celle-ci.

5. *Couches électroniques.*

1° **Il y a sept couches électroniques.** — Elles sont repérées par les lettres **K, L, M, N, O, P, Q** au fur et à mesure que l'on s'éloigne du noyau. Chaque couche peut recevoir un nombre maximal d'électrons : 2 pour K, 8 pour L, 18 pour M, 32 pour N; les couches O, P et Q des éléments actuellement connus sont incomplètes (28, 13, 2).

Lorsqu'une couche est complète, elle est dite **saturée.**

2° **Couche périphérique.** — C'est la plus importante de l'atome, c'est elle qui donne à l'atome ses propriétés chimiques et électriques, on l'appelle aussi couche de valence. Elle comporte toujours un **maximum de huit électrons** sauf pour la couche K dont le maximum reste fixé à deux.

3° **Propriétés des éléments.** — Les éléments dont la couche périphérique ne comporte qu'un, deux ou trois électrons auront tendance à perdre ces électrons; la partie restante de l'atome, appelée ion, sera positive. Les corps ayant cette propriété sont les **métaux** : ce sont de bons conducteurs (Cu, Ag, Al...).

— Les éléments dont la couche périphérique comporte cinq, six ou sept électrons ont tendance à capter des électrons et à devenir des ions négatifs. Les corps ayant cette propriété sont les **non-métaux** [1] : ce sont de mauvais conducteurs (S, O).

— Les éléments ayant quatre électrons périphériques sont intermédiaires entre les deux cas précédents : ce sont les **semi-conducteurs** (C, Si, Ge).

— Les éléments ayant huit électrons périphériques ont leur couche extérieure saturée, ils n'ont aucune tendance et ne donnent pratiquement pas de réactions chimiques : ce sont les **gaz rares** de l'air tous monoatomiques : hélium [2], néon, argon, krypton, xénon, radon.

4° **Classification de Mendeleieff.** — Mendéleieff a eu l'idée, dès 1850, de classer les éléments alors connus (une cinquantaine) dans l'ordre croissant de leurs masses atomiques et en plaçant dans une même colonne ceux qui avaient des propriétés chimiques identiques. Il avait même prévu des places disponibles pour des éléments à découvrir et qui ont été effectivement découverts depuis. La classification actuelle

(1) Ou métalloïdes.
(2) L'hélium ne possède que la couche K saturée à deux électrons.

des éléments — voir tableau page VIII — est peu différente de celle qu'il avait établie.

5° **Atome de Bohr simplifié.** — C'est une représentation schématique dans laquelle les trajectoires électroniques K, L, M ... sont des cercles situés dans un même plan; on en trouvera quelques modèles au 6°.

En réalité les trajectoires sont des ellipses, appelées **orbites** ou **niveaux,** non situées dans un même plan. Chaque couche, sauf K, correspond à plusieurs orbites et à partir des couches M et N il y a chevauchement des ellipses des différentes couches. **Sur chaque orbite l'électron possède une énergie bien déterminée.**

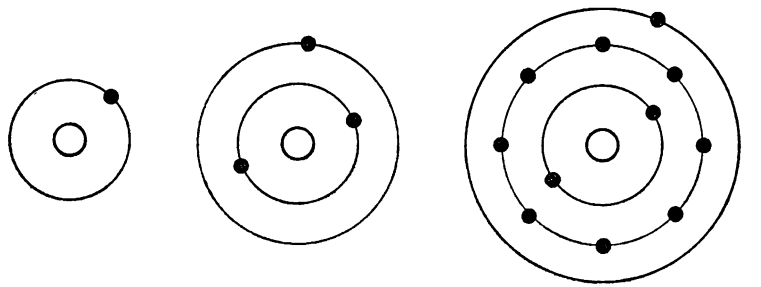


Fig. 6. — *Les trois premiers éléments de la colonne I A.*

6° **Étude sommaire de quelques colonnes de la classification.**

a) *Colonne 1, sous-groupe A.* — Ce sont les métaux alcalins (qui donnent des bases) oxydables à l'air, facilement ionisables (avec peu d'énergie) parce que ne possédant qu'un seul électron périphérique. Le césium, en particulier, constituera la couche sensible des cellules photo-électriques (fig. 6).

b) *Colonne 1, sous-groupe B.* — Ce sont les très bons conducteurs de la chaleur et de l'électricité : cuivre, argent, or (fig. 7). Ils possèdent un seul électron périphérique, quelquefois rejoint par un électron de la couche sous-jacente. Cet électron est très mobile, il est libre de

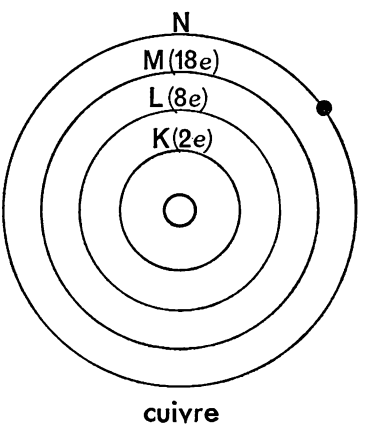


Fig. 7. — *Le premier élément de la colonne I B.*

se déplacer à l'intérieur du métal ce qui explique les propriétés électriques de ces corps.

c) *Colonne 4, sous-groupe B.* — Les trois premiers éléments de la colonne B ont quatre électrons périphériques et des propriétés intermédiaires entre les métaux et les non-métaux : ce sont les semi-conducteurs (fig. 8).

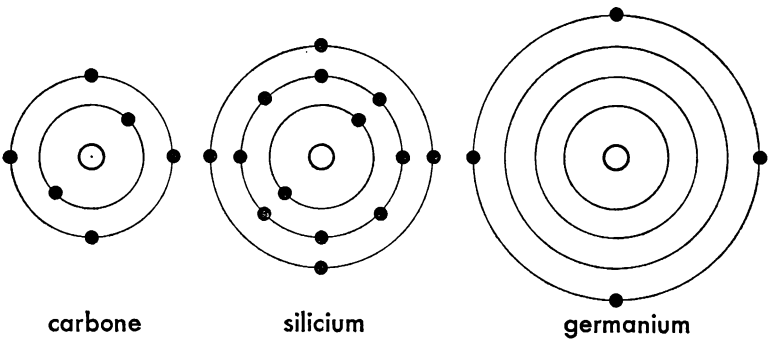


Fig. 8. — *Les trois éléments semi-conducteurs (colonne IV B).*

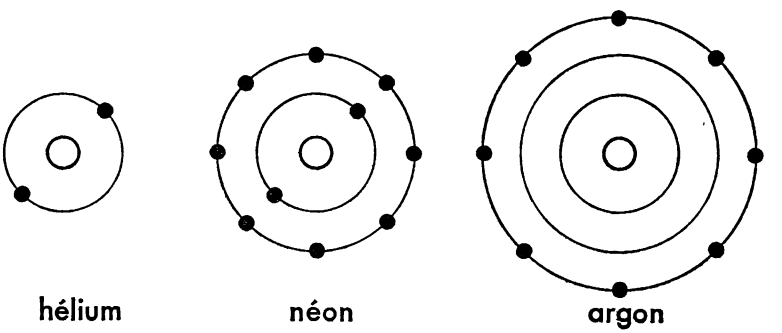


Fig. 9. — *Les trois premiers éléments de la colonne O (gaz rares).*

d) *Colonne O.* — Ce sont les gaz rares de l'air, très stables, chimiquement inactifs ayant huit électrons périphériques, sauf l'hélium qui n'en a que 2 (fig. 9). Ils sont utilisés en éclairage soit comme gaz neutre dans les lampes à incandescence, soit dans les tubes luminescents auxquels ils donnent des couleurs variées (éclairage publicitaire).

6. *Liaisons interatomiques dans les molécules.*

1° **Liaison ionique.** — C'est la liaison des électrolytes. Deux atomes [1], l'un ayant 1 à 3 électrons périphériques l'autre 5 à 7 s'unissent par prêt d'électrons. L'atome ayant le moins d'électrons périphériques en prête à l'autre pour qu'il complète sa couche extérieure à huit. L'atome qui a prêté des électrons est devenu un ion positif, celui qui en a emprunté est devenu un ion négatif (fig. 10). Les deux ions sont liés par des forces électrostatiques.

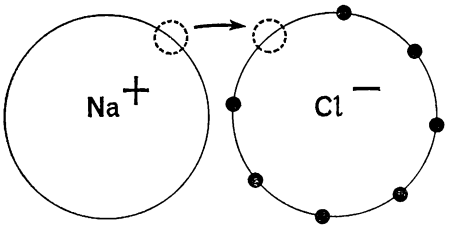


Fig. 10. — *Liaison ionique (NaCl).*

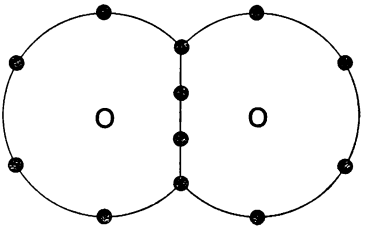


Fig. 11. — *Liaison covalente (O_2).*

En solution aqueuse les deux ions se séparent et la solution contient (dans le cas de NaCl) des ions Na^+ et des ions Cl^-, le sel s'est « dissocié ».

Notons que la liaison ionique est aussi appelée hétéropolaire.

2° **Liaison covalente.** — C'est la liaison des molécules gazeuses diatomiques et des atomes de semi-conducteurs. C'est aussi celle de la plupart des corps de la chimie organique. Les atomes mettent en commun des électrons de façon à saturer à 8 (exceptionnellement 2 pour l'hydrogène) leurs couches périphériques (fig. 11). La liaison covalente est aussi appelée homopolaire.

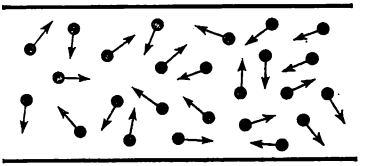


Fig. 12. — *Mouvements désordonnés des électrons dans un métal.*

3° **Liaison métallique.** — Les métaux ont une structure particulière. Chaque atome perd un électron périphérique qui peut ainsi circuler librement dans le métal. Il n'y a plus aucune liaison entre l'élec-

(1) Nous nous limitons à ce cas.

tron libéré et l'atome dont il provient. Bien avant la température ordinaire (20 °C) tous ces électrons sont libres et circulent en tout sens dans le métal : c'est l'agitation désordonnée (fig. 12) comparable à l'agitation moléculaire des gaz.

7. *Ionisation et excitation d'un atome gazeux.*

1° **Apport d'énergie.** — Pour éloigner un électron du noyau de l'atome il faut lui fournir de l'énergie. Si l'énergie est suffisante, l'électron peut passer sur une nouvelle orbite plus éloignée du noyau, l'atome est alors **excité.** Si l'énergie est encore plus importante l'électron peut quitter l'atome et ce dernier est alors **ionisé.**

2° **L'électron-volt (eV).** — Pour exprimer les énergies d'excitation et d'ionisation le joule est une unité trop grande, on utilise l'électron-volt.

a) *Définition.* — L'électron-volt est l'énergie qu'il faut fournir à un électron pour diminuer son potentiel de 1 V.

b) *Valeur.* — Un électron ayant une charge arithmétique de $1{,}6 \times 10^{-19}$ C :

$$1 \text{ eV} = 1{,}6 \times 10^{-19} \times 1 = 1{,}6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$\textbf{(2)} \qquad \boxed{1 \text{ eV} = 1{,}6 \times 10^{-19} \text{ J}}$$

inversement $1 \text{ J} = \dfrac{1}{1{,}6 \times 10^{-19}} = 6{,}25 \times 10^{18}$ eV.

3° **Énergie d'ionisation (W_i).** — C'est l'énergie qu'il faut fournir à un électron pour lui faire quitter définitivement l'atome. Cette énergie varie avec l'atome considéré et avec le rang de l'électron. Nous donnons un tableau correspondant à l'énergie d'ionisation du premier électron de quelques atomes à l'état gazeux.

Atomes	H	He	Ne	Na	Al	Ar	Cu	Zn	Kr	Hg
W_i (eV)	13,5	24,5	21,5	5,1	6,2	15,7	8	9,3	14	10,4

Notons que l'on voit souvent l'énergie d'ionisation exprimée, à tort, en volts. Par contre on peut dire, par exemple, que le potentiel d'ionisation du mercure est 10,4 V, l'énergie restant 10,4 eV.

4° **Énergie d'excitation.** — Elle est évidemment moins élevée que W_i puisqu'il suffit d'écarter l'électron de sa trajectoire au lieu de l'arracher définitivement à l'atome. Cette énergie ne peut prendre n'importe quelle valeur, elle doit correspondre au placement de l'électron sur une nouvelle orbite stable. Ensuite, quand l'électron retombera sur sa trajectoire normale il y aura **émission d'une radiation.** La différence W des énergies correspondant aux deux niveaux (excité et normal) permet le calcul de la fréquence de la radiation émise par la formule :

$$\textbf{(3)} \qquad \boxed{W = hf}$$

h en J.s
f en hertz
W en joules

où h est la constante de Planck $h = 6{,}6 \times 10^{-34}$ J.s [1]

Cette radiation est lumineuse si f appartient au spectre visible :

$$\text{(rouge)} \quad 4 \times 10^{14} \leqslant f \leqslant 7{,}5 \times 10^{14} \quad \text{(violet)}$$

5° **Nature de la lumière.** — On admet aujourd'hui que la lumière transporte à la vitesse de 300 000 km/s dans le vide des grains d'énergie appelés **photons.** L'énergie d'un photon est égale au produit ***hf.*** Elle dépend donc de la fréquence de la radiation.

8. *Radiations électromagnétiques.*

1° **Nature.** — Ce sont des radiations de même nature que la lumière, mais invisibles, et qui se propagent à la même vitesse :

$$c = 300\,000 \text{ km/s dans le vide}$$

2° **Longueur d'onde.** — La longueur d'onde λ est égale au produit de la vitesse de propagation par la période T du phénomène :

$$\lambda = VT, \text{ soit avec } f = \frac{1}{T}$$

$$\textbf{(4)} \qquad \boxed{\lambda = VT = \frac{V}{f}}$$

T en seconde
V m/s
f hertz
λ en mètres

(1) $h = \frac{W}{f} = WT$, W s'exprimant en joules et T en secondes l'unité de h est bien : joule × seconde = J.s.

dans le cas du vide (ou de l'air); $V = c = 3 \times 10^8$ m/s

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{f}$$

Calculs des longueurs d'onde limites du spectre visible :
pour le rouge :

$$\lambda_R = \frac{3 \times 10^8}{4 \times 10^{14}} = 0{,}75 \times 10^{-6} = 0{,}75 \ \mu m$$

pour le violet :

$$\lambda_V = \frac{3 \times 10^8}{7{,}5 \times 10^{14}} = 0{,}4 \times 10^{-6} = 0{,}4 \ \mu m$$

3° **Énergie transportée.** — Toutes les radiations transportent, comme la lumière, de l'énergie sous forme de photons. Le photon est la plus petite quantité d'énergie qui puisse être transportée par la radiation. Cette énergie est donnée par la formule 3 : $W = hf$, soit avec

$$f = \frac{c}{\lambda}, \ W = \frac{hc}{\lambda}$$

Le produit des deux constantes $h \times c$ peut être effectué une fois pour toutes :

$$hc = 6{,}6 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8 = 19{,}8 \times 10^{-26}$$

4° **Vue d'ensemble des radiations électromagnétiques** (fig. 13). — Les radiations électromagnétiques ont des origines, des propriétés

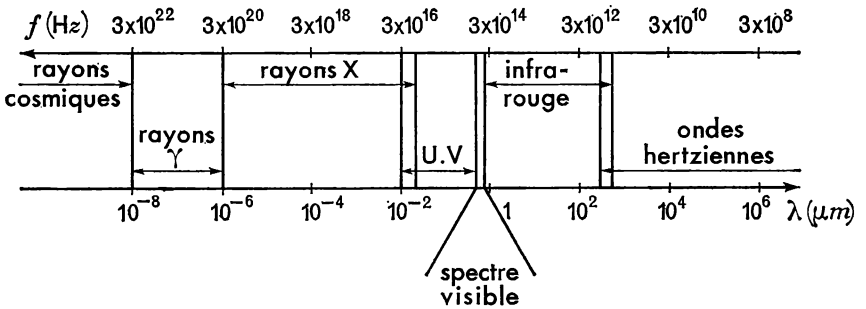


Fig. 13. — *Spectre des radiations électromagnétiques (U. V. : ultra-violet).*

et des usages très différents mais sont toutes de même nature. Ce dernier point est confirmé par le fait que l'on a pu produire, par des procédés différents, des radiations ayant la même longueur d'onde. Il en est ainsi des radiations de quelques dixièmes de mm qui ont été produites à la

fois avec des sources de rayonnement infra-rouge et par oscillations électriques (ondes hertziennes). Les radiations électromagnétiques forment un spectre continu. On rencontre dans l'ordre des longueurs d'ondes croissantes (fréquences décroissantes) :

NOM DES RADIATIONS	λ	f (Hz)	PRINCIPALES ORIGINES (1)
Rayons cosmiques	$\leqslant 10^{-2}$ pm	$\geqslant 3 \times 10^{22}$	R. S.
Rayons γ	10^{-2} pm à 1 pm	3×10^{22} à 3×10^{20}	R. S. + Radioactivité
Rayons X	1 pm à 20 000 pm	3×10^{20} à $1{,}5 \times 10^{16}$	R. S. + tubes à rayons X
Rayons ultra-violets	0,01 μm à 0,4 μm	3×10^{16} à $7{,}5 \times 10^{14}$	R. S. + tubes à vapeur de mercure
Lumière visible	0,4 μm à 0,75 μm	$7{,}5 \times 10^{14}$ à 4×10^{14}	R. S. + tous les systèmes d'éclairage
Rayons infra-rouges	0,75 μm à 500 μm	4×10^{14} à 6×10^{11}	R. S. + corps chauds
Ondes hertziennes (2)	$\geqslant 300$ μm	$\leqslant 10^{12}$	R. S. + Radio, Télévision, radar

(1) R.S. = Radiations solaires.
(2) Jusqu'à plusieurs kilomètres.

EXERCICES

1. 01. — Combien y a-t-il de molécules dans 1 mm^3 d'eau liquide à 0 °C? [33×10^{18}].

1. 02. — Les trois milliards d'habitants de la terre se partagent également les 6×10^{23} molécules d'une mole et les comptent à raison de 1 par seconde. Combien de siècles leur faut-il? On prendra 1 siècle = 877 000 heures [63 000].

1. 03. — Calculer la masse d'une molécule d'oxygène : $O_2 = 32$ [$5{,}3 \times 10^{-23}$ g].

1. 04. — Calculer le volume d'une molécule sphérique d'hydrogène ($d_a = 274$ pm) [$10{,}7 \times 10^{-30}$ m^3].

1. 05. — Calculer le volume de 6×10^{23} molécules d'hydrogène et comparer à 22,4 l [$6{,}4 \times 10^{-6}$ m^3].

1. 06. — Calculer le nombre de molécules contenu dans 1 m^3 de mercure gazeux à la pression de 10^{-2} mm de mercure et à 0 °C [354×10^{18}].

1. 07. — Calculer le L.P.M. d'une molécule de mercure de l'exercice précédent [1,64 mm].

1. 08. — Le L.P.M. d'une molécule étant de 1 mm, que devient-il si la pression double sans changement de température? [0,5 mm].

1. 09. — En utilisant le tableau de Mendéleieff (p. VIII) déterminer les nombres de protons, d'électrons et de neutrons du césium (Cs). Quelle est la charge du noyau? [55-55-78-88 $\times 10^{-19}$].

1. 10. — Mêmes questions pour : le sodium, le manganèse, le krypton, l'argent, le germanium, l'antimoine, le xénon.

1. 11. — Calculer, en électrons-volts et en joules, la variation d'énergie d'un électron dont le potentiel varie de 150 V [150 eV — $2{,}4 \times 10^{-17}$ J].

1. 12. — Même question pour les variations de potentiel suivantes : 5 V — 42 V — 800 V — 3 000 V.

1. 13. — Calculer en joules, puis en électrons-volts, l'énergie du photon qui correspond aux deux limites du spectre visible [$49{,}5 \times 10^{-20}$ et $26{,}4 \times 10^{-20}$ J; 3,1 et 1,65 eV].

1. 14. — Mêmes questions pour les limites : des rayons γ, des rayons X, des rayons U. V., des infra-rouges.

1. 15. — Calculer la longueur d'onde d'une radiation de fréquence $f = 10^{16}$ Hz [30 nm].

1. 16. — Calculer la fréquence d'une radiation dont la longueur d'onde est 1 nm [3×10^{17}].

1. 17. — Compléter le tableau suivant et situer la radiation dans le spectre.

f (Hz) . .	10^{15}		10^{21}	5×10^{14}			2×10^{12}		10^{6}		10^{18}	
λ (nm). .		500			10	600		10^{10}		10^{12}		5

1. 18. — Calculer la fréquence et la longueur d'onde d'une radiation dont la période est 1 picoseconde [10^{12}—0,3 mm].

1.19. — Dans la formule $W = \frac{hc}{\lambda}$, on exprime W en eV. La formule peut s'écrire $W = \frac{a}{\lambda}$, calculer a [$1{,}24 \times 10^{-6}$].

1. 20. — Dans la formule précédente on exprime en outre λ en μm, on peut écrire $W = \frac{b}{\lambda}$, calculer b [1,24].

2

ÉMISSIONS ÉLECTRONIQUES DANS LE VIDE

9. *Extraction d'un électron du métal.*

1° **Nécessité d'un apport d'énergie.** — Nous savons que des électrons (1 par atome) circulent librement à l'intérieur d'un métal. Ils possèdent donc une énergie cinétique $\left(\frac{1}{2}mv^2\right)$ et l'on pourrait croire que grâce à cette énergie ils ont la possibilité de « sortir » du métal ; il n'en est rien, au moins à basse température (20 °C par exemple). Pourquoi cette impossibilité ? Parce qu'il existe entre le métal et le vide une **barrière de potentiel V_s** de plusieurs volts et les électrons ne pourront la franchir que si leur énergie devient supérieure à eV_s (électrons-volts). Or à 20 °C l'énergie $\frac{1}{2}mv^2$ est bien inférieure à cette valeur. Pour sortir du métal, l'électron aura donc besoin d'un **apport d'énergie supplémentaire.**

2° Définition. — **On appelle énergie d'extraction ou de sortie, l'énergie totale dont un électron a besoin pour avoir la possibilité de quitter le métal solide dans lequel il se trouve;** cette énergie est notée W_s, elle s'exprime en électrons-volts.

A l'énergie d'extraction, correspond un **potentiel d'extraction V_s** (volts) qui s'exprime en volts par le même nombre que W_s.

Exemple : tungstène ; $W_s = 4{,}5$ eV et $V_s = 4{,}5$ V

3° **Quelques valeurs.** — L'énergie d'extraction dépend uniquement de la nature du métal.

Métal	Al	K	Ca	Ni	Zn	Rb	Sr	Ag	Co	W	Hg
W_s	3,0	2,2	3,2	5,0	3,4	2,1	2,7	4,7	1,8	4,5	4,5

REMARQUE. — Pour un même métal, l'énergie d'extraction du solide est inférieure à l'énergie d'ionisation du gaz.

EXEMPLE : mercure $W_s = 4{,}5$ eV $<$ $W_i = 10{,}4$ eV

4° **Énergie à fournir.** — Soit W_0 l'énergie propre de l'électron et W l'énergie apportée, l'extraction n'est possible que si :

$$W_0 + W \geqslant W_s$$

Si l'extraction se fait au voisinage de 20 °C ou à une température inférieure, W_0 est négligeable et pratiquement il faut avoir :

$$W \geqslant W_s$$

5° **Procédés d'apport d'énergie.** — a) *Par chauffage du métal.* — L'énergie propre W_0 étant proportionnelle à la température absolue T (°K), en chauffant le métal on augmente cette énergie. Ce procédé est appelé émission thermoélectronique (Étude au § 10).

b) *Par radiations électromagnétiques.* — Le métal est bombardé par des photons apportant leur énergie *hf*, c'est l'émission photoélectronique (Étude au § 11).

c) *Par bombardement d'électrons, émission secondaire.* — L'étude en sera reprise avec le tube tétrode. Lorsque l'anode d'un tube à vide est bombardée par des électrons dits **primaires,** l'énergie de ceux-ci peut être suffisante pour provoquer l'éjection d'un ou plusieurs électrons,

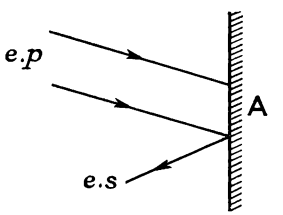


Fig. 14. — *Les électrons primaires (e.p.) peuvent éjecter des électrons secondaires (e.s.).*

dits **secondaires,** de l'anode. L'émission est théoriquement possible dès que l'énergie des électrons incidents est supérieure à W_s. Si au voisinage de l'anode se trouve une autre électrode dont le potentiel est également positif, les électrons secondaires éjectés pourront la rejoindre et donner naissance à un courant secondaire (fig. 14).

d) *Par champ électrique.* — Ce procédé peut sembler le plus simple puisqu'il suffit de quelques volts pour l'extraction ; malheureusement

ces quelques volts doivent être fournis sur une distance [1] de l'ordre de 0,1 μm soit en produisant un champ électrique de :

$$\frac{\text{quelques volts}}{10^{-7}\ \text{m}} \simeq 10^{8}\ \text{V/m}.$$

ce champ énorme conduit à une d.d.p. de 1 MV entre deux électrodes distantes de 1 cm et le procédé ne peut être retenu pour les applications courantes.

10. *Émission thermoélectronique dans le vide.*

1° **Principe.** — Un filament métallique placé dans le vide est chauffé par effet joule. L'énergie de ses électrons libres croît et certains

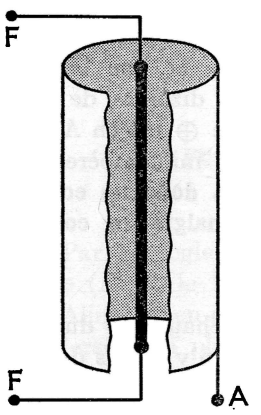


Fig. 15. — *Coupe montrant les positions relatives du filament* F *et de la plaque* A.

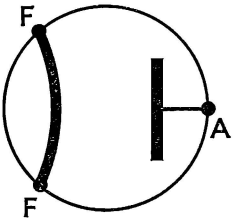


Fig. 16. — *Symbole d'un tube d'iode à chauffage direct.*

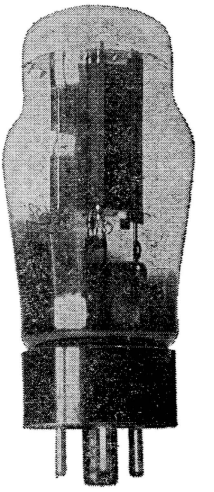


Fig. 17. — *Tube à vide.*

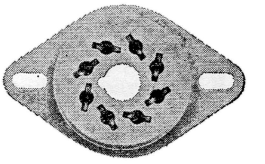


Fig. 18. — *Support de tube.*

d'entre eux peuvent sortir du métal. Le plus simple des appareils dans lequel on produit ce phénomène est le tube diode à vide.

(1) Compte tenu des dimensions atomiques, un dixième de micron est énorme et à cette distance l'électron est déjà sorti du métal.

2° **Le tube diode.** — La diode ou tube diode [1] est un tube en verre dans lequel on a réalisé un vide de 10^{-6} mm de mercure et qui contient deux électrodes : **le filament F et la plaque A** (fig. 15).

Le filament devant être chauffé électriquement par effet joule, ses extrémités correspondent à deux bornes ; pour la plaque, une borne de sortie suffit (symbole fig. 16).

Le bas du tube, appelé culot, comporte 7 à 9 broches auxquelles sont reliées les électrodes (fig. 17). Toutes les broches ne sont donc pas utilisées. Un ergot permet de positionner le tube sur un support dans lequel s'enfoncent les broches (fig. 18).

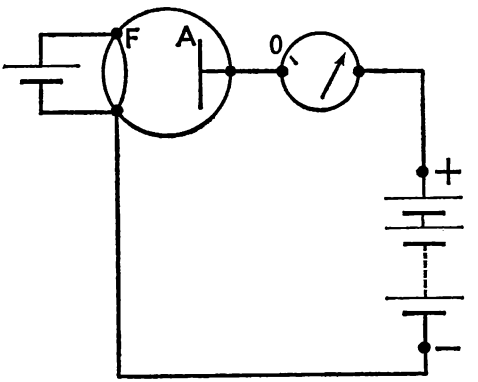


Fig. 19. — *Avec un filament chauffé et un pôle + en A il y a un courant.*

3° **Expérience** (fig. 19). — Le filament est alimenté par une source de quelques volts. Entre le filament et la plaque nous plaçons un milliampèremètre et une batterie de quelques dizaines de volts dont le pôle ⊕ est en A et le ⊖ en F : le milliampèremètre dévie. **Il y a donc un courant électrique malgré la coupure due à l'espace vide compris entre F et A.**

4° **Contre-expériences.** — *a*) Supprimons le chauffage du filament et attendons le refroidissement de ce dernier ; il n'y a plus de courant (fig. 20*a*).

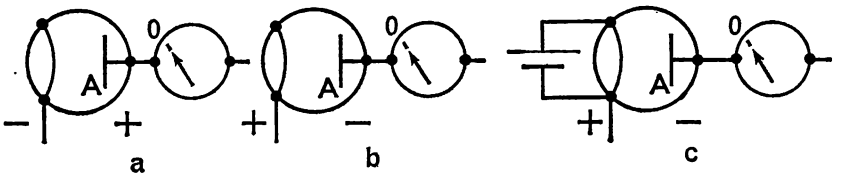


Fig. 20. — *Il n'y a pas de courant* a et b : *sans chauffage;* c : *avec chauffage et* A *négatif.*

(1) Au début le tube fut appelée « la lampe diode », c'est pourquoi le mot diode, employé comme substantif, est indifféremment du masculin ou du féminin.

b) Le chauffage étant toujours supprimé, inversons les polarités de la batterie (fig. 20*b*); pas de courant.

c) Les polarités restant inversées, rétablissons le chauffage (fig. 20*c*); le courant reste nul.

5° **Conclusion, sens du courant. — Le tube diode ne conduit qu'à la double condition que son filament soit chauffé et soit négatif par rapport à la plaque.** Le courant (sens conventionnel) ne peut donc traverser que dans un seul sens le vide interélectrode : **de la plaque vers le filament** (fig. 21).

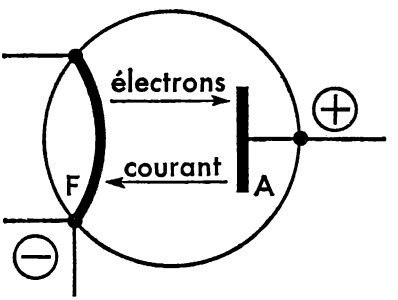


Fig. 21.

Filament chauffé ⊖ **électrons** ⊕ **Plaque**
courant

Par analogie avec une cuve d'électrolyse, la plaque est appelée **anode** (A) et le filament **cathode** (K).

Alimenté en alternatif le tube diode ne sera traversé par un courant que lorsque la plaque sera positive, ce courant est dit **unidirectionnel;** le tube diode est un **redresseur.**

Le tube diode a en électricité un rôle analogue à celui d'une « **valve** » ou d'une « **soupape** » en mécanique. Ces deux noms sont parfois utilisés pour le désigner.

6° **Origine de la conduction. — Le filament étant seul chauffé, seuls ses électrons sont susceptibles de sortir du métal;** une fois sortis. ces électrons sont soumis au champ électrique produit par la d.d.p. qui existe entre l'anode et le filament :

— si l'anode est positive, elle attire les électrons et il y a courant malgré le vide ;

— si l'anode est négative, elle repousse les électrons et il n'y a pas de courant.

7° **Charge d'espace.** — Dès qu'un électron, avec sa charge négative, a quitté le métal, il laisse dans celui-ci une charge positive non compensée ; il en résulte une force électrostatique de rappel qui invite l'électron à réintégrer le métal (fig. 22). Finalement à chaque instant un certain nombre d'électrons quittent le métal grâce à leur énergie et d'autres électrons retournent au métal par action électrostatique. A une température donnée il y a un équilibre rigoureux entre le nombre d'électrons « sortants » et le nombre d'électrons « rentrants » **le nombre d'électrons se trouvant hors du métal est constant et ne dépend que de la**

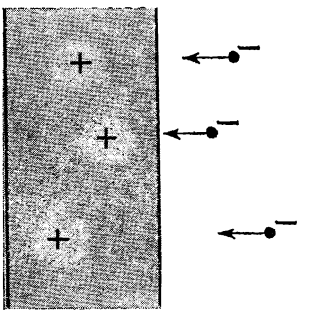


Fig. 22. — *Les électrons qui ont quitté le métal sont soumis à une force de rappel.*

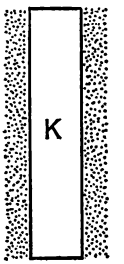


Fig. 23.
Le nuage électronique.

température. Ces électrons entourent le métal d'un « **nuage électronique** » négatif qui est appelé **charge d'espace** (fig. 23).

8° Le champ électrique existant entre les deux électrodes est de l'ordre de $\frac{100\ \text{V}}{0{,}01\ \text{m}} = 10^4\ \text{V/m}$, il est donc nettement insuffisant pour provoquer la sortie des électrons du filament. La plaque ne peut donc attirer que des électrons déjà sortis du filament.

C'est dans la charge d'espace et non dans le filament que la plaque puise les électrons.

11. *Émission photoélectronique.*

1° **Cellule photoémissive à vide.** — C'est un tube à vide poussé (10^{-6} mm de mercure) contenant deux électrodes :

— La cathode ou **surface émissive** est un support métallique rigide sur lequel est déposé un métal alcalin (potassium, césium).

— L'anode est un fil métallique (fig. 24).
Le symbole en est donné fig. 25.

2° **Expérience.** — La cellule en série avec une résistance de 1 MΩ est alimentée par une source de tension continue réglable U_b (fig. 26). La tension étant de 90 V et la surface émissive éclairée, le microampère-mètre indique 3 μA. **Il y a donc un courant électrique malgré la coupure due à l'espace vide compris entre l'anode et la cathode.**

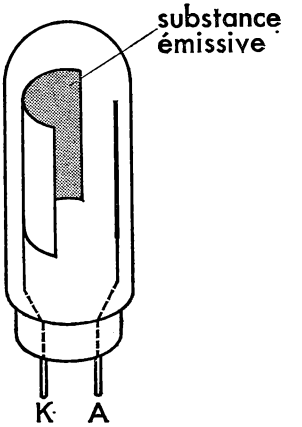


Fig. 24. — *Cellule photo émissive.*

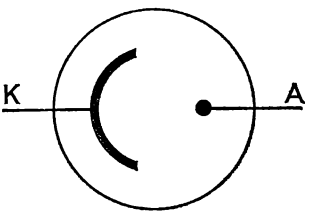


Fig. 25. — *Symbole d'une cellule à vide.*

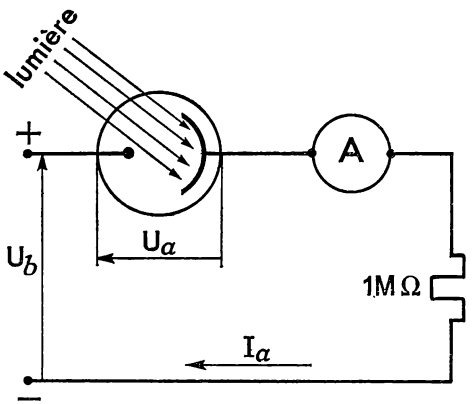


Fig. 26. — *Montage expérimental.*

3° **Contre-expériences.** — *a*) Masquons avec du papier noir la surface émissive afin qu'elle ne reçoive plus de lumière : le courant est à peu près nul (fig. 27*a*).

b) Inversons les polarités de la batterie en laissant la cathode dans l'obscurité : il n'y a pas de courant (fig. 27*b*).

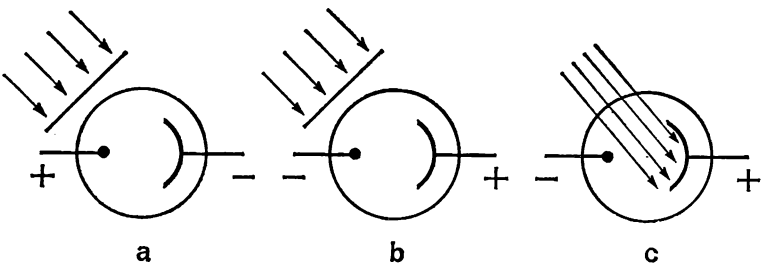


Fig. 27. — *Le courant reste nul.*
— *Si la surface émissive reste négative mais ne reçoit plus de lumière* (a).
— *Si la surface émissive est positive, qu'elle reçoive ou non de la lumière* (b et c).

c) Les polarités restant inversées, démasquons la surface émissive et éclairons-la : le courant reste nul (fig. 27*c*).

4° Conclusion, sens du courant. — Le tube ne conduit qu'à la double condition que la cathode soit éclairée et négative par rapport à l'anode. Le courant (sens conventionnel) ne peut donc traverser que

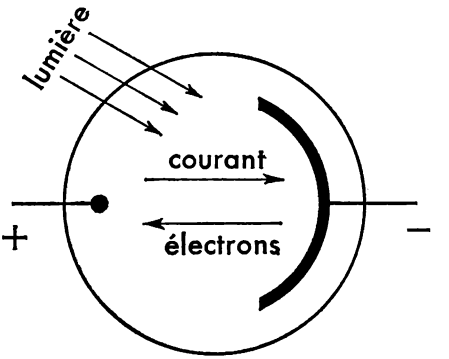
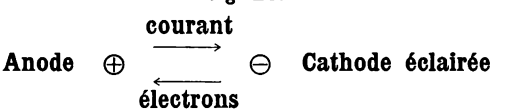


Fig. 28.



dans un seul sens le vide interélectrode : **de l'anode vers la surface émissive** (fig. 28).

5° Origine de la conduction. — Quand la cellule est éclairée elle reçoit des radiations électromagnétiques lumineuses. Ces radiations

produisent un bombardement par photons de la surface émissive. Chaque photon apporte une énergie $W = hf$ (formule 3).

Si cette énergie est inférieure à l'énergie d'extraction il n'y a pas d'électron arraché.

Si cette énergie est supérieure à W_s il peut y avoir extraction :

$$hf \geqslant W_s \Rightarrow \textbf{extraction possible}$$

Une fois extraits de la cathode les électrons sont sollicités par le champ électrique dû à la d.d.p. cathode-anode et rejoignent cette dernière si elle est positive.

3

L'ÉLECTRON DANS LE VIDE

MASSE : $m = 0{,}91 \times 10^{-30}$ kg	CHARGE : $-e = -1{,}6 \times 10^{-19}$ C

12. *Rappels d'électrostatique.*

1° **Champ électrique uniforme.** — C'est celui qui existe entre deux plans parallèles uniformément chargés (fig. 29). Ses lignes de champ sont des droites parallèles entre elles. Le vecteur champ $\vec{E}$ a le même

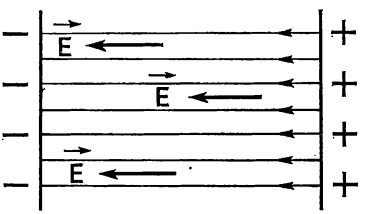


Fig. 29. — *Champ uniforme.*

module en tout point, si U est la d.d.p. entre les plans et d leur distance, le champ est :

$$\textbf{(5)} \qquad \boxed{E = \frac{U}{d}}$$

U en volts
d en mètres
E en V/m

2° **Force s'exerçant sur une charge placée dans un champ électrique.** — *a*) Elle est donnée par la formule :

$$\textbf{(6)} \qquad \boxed{\vec{F} = q\vec{E}}$$

E en V/m
q en coulombs
F en newtons

b) Si q est positive, $\vec{F}$ a le même sens que $\vec{E}$ (fig. 30*a*).
Si q est négative $\vec{F}$ est de sens opposé à $\vec{E}$ (fig. 30*b*).

EXEMPLE. — Un électron est placé dans un champ de 10 000 V/m :

$$F = 1{,}6 \times 10^{-19} \times 10^{4} = 1{,}6 \times 10^{-15}\ N$$

La charge d'un électron étant négative, $\vec{F}$ et $\vec{E}$ sont de sens contraires.

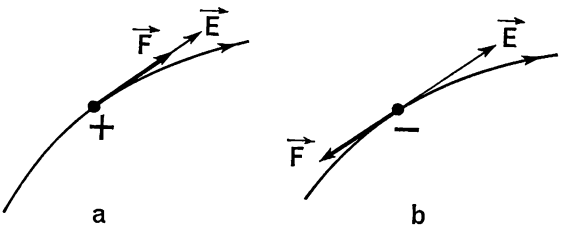


Fig. 30. — *Forces dues à un champ électrique.*

3° Travail d'une charge électrique.

a) *Dans un champ uniforme E.* — Si x est le déplacement de la charge dans la direction de la force qui lui est appliquée, le travail est :

$$W = Fx = qEx.$$

Le produit de E par x est la différence U des potentiels entre le point A de départ et le point B d'arrivée, finalement

$$W = q\ (V_A - V_B) = qU$$

b) *Dans un champ quelconque.* — On démontre que la formule reste valable.

c) *Pour un électron.* — En valeur absolue $q = e$ et

$$\boxed{W = eU} \qquad \begin{cases} e \text{ en C} \\ U \text{ en V} \\ W \text{ en J} \end{cases} \quad \text{ou} \quad \begin{cases} e \text{ électron} \\ U \text{ en V} \\ W \text{ en eV} \end{cases}$$

d) Une charge positive « descend » spontanément les potentiels. Une charge négative, donc un électron, au contraire « remonte » les potentiels.

13. *Mécanique de l'électron.*

1° Tant que sa vitesse n'est pas trop élevée. — Les lois de la mécanique classique s'appliquent à l'électron. Si la vitesse devient trop grande, il faut lui appliquer les lois de la mécanique relativiste (voir 6°) dues à Einstein (1905).

2° **Principe de l'inertie.** — Un électron qui n'est soumis à aucune force est soit au repos, soit en mouvement rectiligne uniforme.

3° **Application d'une force constante.** — Une force constante communique à un électron une accélération constante :

$$\vec{\Gamma} = \frac{\vec{F}}{m} \quad \text{soit en modules} \quad \gamma = \frac{F}{m} \qquad \begin{cases} F \text{ en newtons} \\ m \text{ en kg} \\ \gamma \text{ en m/s}^2 \end{cases}$$

4° **Mouvement circulaire uniforme.** — Il résulte de l'application d'une force centripète constante à un électron dont la vitesse, de module constant, est perpendiculaire à la force (fig. 31).

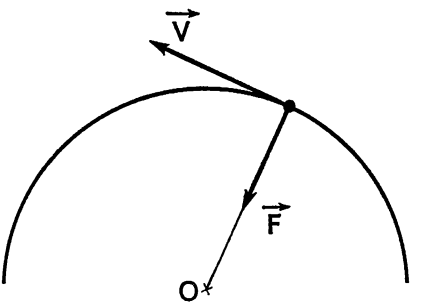


Fig. 31. — *Mouvement circulaire uniforme.*

La force d'inertie centrifuge est égale à la force centripète

$$\boxed{F = \frac{mv^2}{R}} \qquad \begin{cases} m \text{ en kg} \\ v \text{ en m/s} \\ R \text{ en m} \\ F \text{ en N} \end{cases}$$

Rappelons que l'on a aussi $F = m\omega^2 R$ (ω en rd/s).

5° **Énergie cinétique.** — Elle est donnée par la formule classique :

$$\boxed{W_c = \frac{1}{2} mv^2} \qquad \begin{cases} v \text{ en m/s} \\ m \text{ en kg} \\ W_c \text{ en joules} \end{cases}$$

Le théorème de l'énergie cinétique est applicable à l'électron.

6° **Notions de mécanique relativiste.** — *a*) La masse d'un corps n'est pas constante, elle varie avec sa vitesse suivant la formule :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

où m_0 est la masse au repos et c la vitesse de la lumière dans le vide. Tant que v^2 est négligeable devant c^2, le dénominateur diffère peu de l'unité et $m \simeq m_0$.

EXEMPLE : $v = 30\,000$ km/s soit $v = \frac{c}{10}$, $\frac{v^2}{c^2} = \frac{1}{100}$ et

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \sqrt{0{,}99} \simeq 0{,}995 \Rightarrow m = 1{,}005\ m_0$$

b) Déterminons v pour que l'erreur sur m soit au plus égale à 1 %, soit :

$$m = 1{,}01\ m_0 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{1}{1{,}01} \simeq 0{,}99 \quad \text{et} \quad 1 - \frac{v^2}{c^2} \simeq 0{,}99^2 \simeq 0{,}98$$

enfin

$$\frac{v^2}{c^2} = 0{,}02 = \frac{1}{50} \Rightarrow v^2 = \frac{c^2}{50} \quad \text{et} \quad v \simeq \frac{c}{7}$$

La vitesse limite, au-delà de laquelle l'erreur sur la masse dépasse 1 % est :

$$\boxed{v = \frac{c}{7} \simeq 43\,000 \text{ km/s}}$$

Remarquons que pour $v = c = 300\,000$ km/s, la masse devient infinie. La vitesse de la lumière est une limite que l'on ne pourra jamais dépasser ni même atteindre.

c) L'énergie cinétique relativiste est :

$$W_c = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right)$$

14. *Courant électronique dans le vide.*

1° Mouvement des électrons. — Dans un tube à vide, dès qu'il est sorti du métal, l'électron se trouve placé dans le champ électrique $E = \frac{U}{d}$ dû à la d.d.p. U qui existe entre l'anode et la cathode (d, distance interélectrode) ; il est donc soumis à une force électrostatique $\vec{F} = q\vec{E}$ de module $F = eE$ et de sens opposé au champ (charge négative, fig. 32).

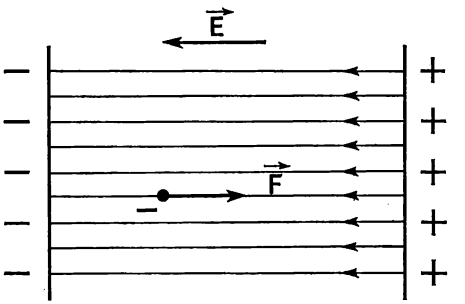


Fig. 32. — *Électron dans un champ uniforme.*

D'une part, la vitesse initiale de l'électron est pratiquement nulle et, d'autre part, on peut admettre que le champ E est sensiblement constant d'une électrode à l'autre, or,

$$E = \text{Cte} \Rightarrow F = \text{Cte}$$

→ Le mouvement de l'électron est celui d'une particule sans vitesse initiale et soumise à une force constante : **c'est un mouvement rectiligne uniformément accéléré.**

2° Calcul de l'accélération. — En valeurs absolues, $F = qE = eE$, l'accélération est donc $\gamma = \frac{F}{m} = \frac{eE}{m}$

Tous les électrons ayant même masse et même charge, le rapport e/m, appelé **charge spécifique** peut être calculé une fois pour toute :

$$\frac{e}{m} = \frac{1{,}6 \times 10^{-19}}{0{,}91 \times 10^{-30}} = 1{,}76 \times 10^{11} \text{ C/kg}$$

finalement $\gamma = 1{,}76 \times 10^{11} E$

Exemple. — Un champ modéré de 1 000 V/m donne

$$\gamma = 1{,}76 \times 10^{11} \times 10^{3} = 1{,}76 \times 10^{14} \text{ m/s}^2$$

soit environ $1{,}8 \times 10^{13}$ fois l'accélération de la pesanteur!

Cette dernière sera donc toujours négligeable par rapport aux accélérations résultant du champ électrique (voir problème 3.12).

3° **Énergie cinétique.** — *a*) Le travail fourni pendant la traversée du vide est égal au produit de la force constante F par le déplacement d :

$$W = Fd \text{ avec } F = eE \text{ et } E = \frac{U}{d}, \text{ donc } W = eE \times \frac{U}{E} = eU.$$

b) Si v est la vitesse finale de l'électron à son arrivée sur l'anode, son énergie cinétique finale est $W_f = \frac{1}{2}mv^2$, comme la vitesse initiale est nulle, il en est de même de l'énergie cinétique initiale W_0 et la variation est :

$$\Delta W_c = W_f - W_0 = \frac{1}{2}mv^2$$

c) Appliquons le théorème de l'énergie cinétique :

ΔW_c = travail de la force

$$\textbf{(7)} \qquad \boxed{\frac{1}{2}mv^2 = eU}$$

$e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C
U en volts
m en kg
v en m/s

4° **Vitesse finale de l'électron.** — La tension de lancement, ou d'accélération étant U, l'électron atteint une vitesse :

$$eU = \frac{1}{2}mv^2 \Rightarrow v^2 = \frac{2eU}{m} \text{ et avec } \frac{e}{m} = 1{,}76 \times 10^{11}$$

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}} = \sqrt{3{,}52 \times 10^{11} U} = 593\,000 \sqrt{U}$$

avec U en volts et v en m/s. Exprimons v en km/s :

$$\textbf{(7 \textit{bis})} \qquad \boxed{v = 593 \sqrt{U}}$$

U en volts
v en km/s

pour U = 100 V, on a déjà v = 5 930 km/s.

A partir de v = 40 000 km/s il faut tenir compte des variations de masse. Pour U = 10 000 V on trouve v = 59 300 km/s avec la formule *7bis*. La vitesse réelle sera un peu inférieure. En gros la formule s'applique jusqu'à 10 000 V inclusivement.

5° **Échauffement des corps frappés par les électrons.** — Lorsque des électrons arrivent sur une plaque métallique leur vitesse est brusquement annulée et leur énergie cinétique est transformée en

chaleur. Les corps s'échauffent donc quand ils sont bombardés par des électrons.

Soient n le nombre d'électrons arrivant avec la vitesse v, M la masse de la plaque et c sa chaleur massique, en supposant que la plaque ne se refroidit pas l'échauffement Δt s'obtient en écrivant l'égalité des énergies cinétique et calorifique, $n \times \frac{1}{2} mv^2 = Mc\,\Delta t$ d'où l'échauffement :

$$\Delta t = \frac{nmv^2}{2Mc}$$

6° **Courant et électrons.** — La charge de l'électron étant $1{,}6 \times 10^{-19}$ C, chaque électron qui passe par seconde dans un circuit équivaut à un courant de $1{,}6 \times 10^{-19}$ A. Si le nombre d'électrons par seconde est N le courant est donc :

$$\textbf{(8)} \qquad \boxed{I = Ne}$$

N électrons /s
$e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C
I en ampères

15. *Action déviatrice d'un champ électrique uniforme.*

1° **Tube cathodique.** — Son étude détaillée sera effectuée au chapitre suivant. Contentons-nous de savoir qu'il comporte une cathode chauffée qui émet des électrons et une anode percée d'un trou (fig. 33) :

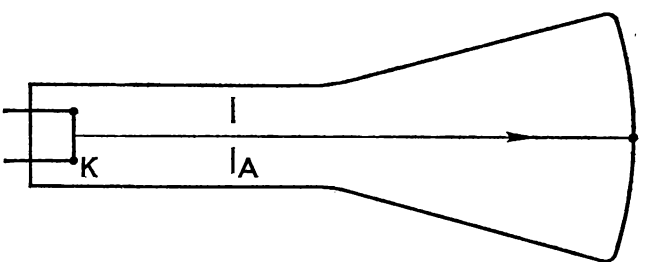


Fig. 33. — *L'anode étant percée les électrons continuent leur route jusqu'à l'écran.*

les électrons seront ainsi accélérés par l'anode sans être arrêtés par elle, ils continueront leur mouvement rectiligne jusqu'à un écran qui devient lumineux au point d'impact des électrons, ce point est appelé **spot** (1).

(1) Spot = tache.

2° **Expérience.** — Si l'on applique une d.d.p. entre deux plaques horizontales placées à l'extérieur ou à l'intérieur du tube, il existe entre elles un champ électrique vertical. Lorsque les électrons traversent ce champ ils sont attirés par la plaque positive et le spot subit un déplacement vertical (fig. 34).

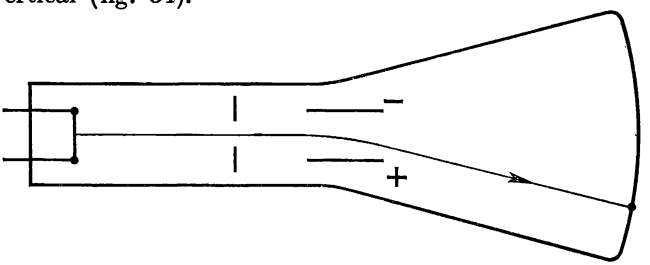


Fig. 34. — *Action déviatrice d'un champ électrique.*

3° **Étude du mouvement des électrons.** — Chaque électron arrive dans le champ avec une vitesse initiale V et est alors soumis à une force constante (champ supposé uniforme) $F = eE$ perpendiculaire à V ; l'électron est alors animé d'un mouvement parabolique [1] (fig. 35).

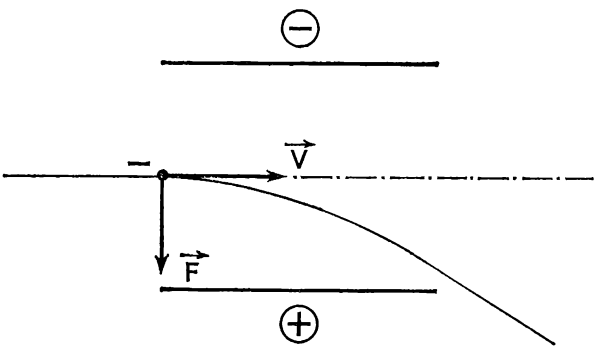


Fig. 35. — *L'électron est dévié.*

16. *Action déviatrice d'un champ magnétique uniforme.*

1° **Expérience.** — Plaçons un aimant à cheval sur la partie cylindrique d'un tube cathodique de façon que le champ magnétique soit horizontal. Le spot subit un déplacement vertical perpendiculaire à la fois à $\vec{B}$ et à $\vec{V}$ (fig. 36).

(1) Analogie avec un corps pesant lancé horizontalement.

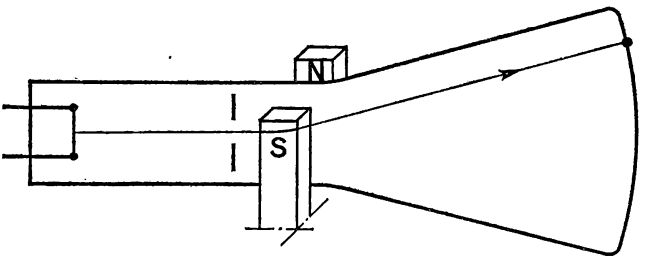


Fig. 36. — *Action déviatrice d'un champ magnétique.*

2° **Courant équivalent à un électron en mouvement.** — Soit dl le chemin parcouru par l'électron en un temps dt, sa vitesse est $v = \frac{dl}{dt}$. La charge de l'électron étant $dq = e$, le courant correspondant au même temps dt est; $i = \frac{dq}{dt} = \frac{e}{dt}$. En égalant les deux expressions de dt on obtient :

$$dt = \frac{dl}{v} = \frac{e}{i} \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{idl = ev}$$

3° **Force de Laplace.** — La force électromagnétique qui s'exerce sur un élément de courant perpendiculaire à l'induction est $F = Bidl$. Sur l'électron on a donc, quand $\vec{V}$ et $\vec{B}$ sont perpendiculaires :

$$\boxed{F = Bev}$$

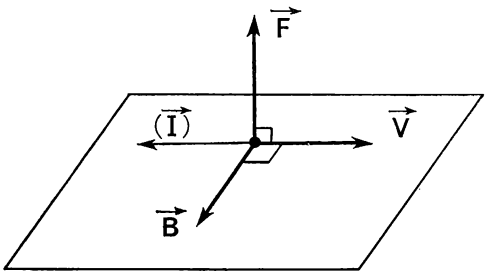


Fig. 37. — *Force électromagnétique s'exerçant sur un électron.*

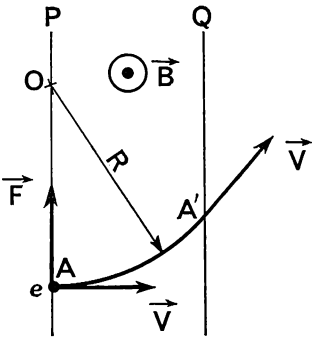


Fig. 38.

La force $\vec{F}$ est perpendiculaire à la fois à $\vec{B}$ et à $\vec{V}$. — Ne pas oublier que l'électron est négatif et équivaut à un courant de sens opposé à sa vitesse (fig. 37). Si l'électron est au repos, v est nul et F aussi : *le champ magnétique est sans action sur un électron au repos.*

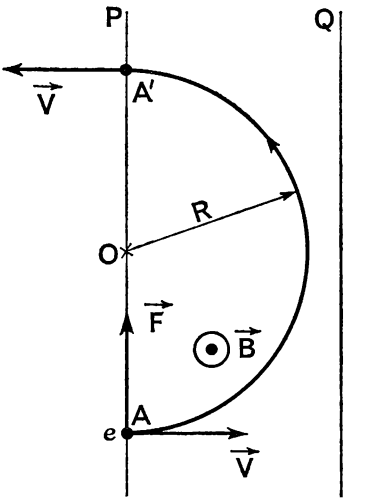


Fig. 39.

4° Mouvement de l'électron dans le champ. — Nous supposons le champ uniforme et strictement limité par les plans P et Q (fig. 38) : nul à gauche de P et à droite de Q. L'induction $\vec{B}$ constante entre P et Q est perpendiculaire au plan de la figure et dirigée vers l'avant.

L'électron entre dans le champ en P avec une vitesse initiale V, il est alors soumis à une force constante (B supposé constant) $F = Bev$ et décrit un arc de cercle. Quand il sort du champ en Q avec sa vitesse initiale V il a subi une déviation.

La force électromagnétique est la **force centripète** appliquée à l'électron : $Bev = \frac{mv^2}{R}$, on en déduit le rayon de la trajectoire :

$$\textbf{(9)} \qquad \boxed{R = \frac{mv}{eB}}$$

m en kg
v en m/s
$e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C
B en teslas
R en mètres

Si la distance entre P et Q est plus grande que R, l'électron sort du champ en A′ après avoir décrit un demi-cercle (fig. 39).

EXERCICES

3. 01. — Un électron est placé dans un champ uniforme dû à deux plaques parallèles. La tension entre les deux plaques est U = 200 V et la distance d = 5 cm. Calculer la force qui s'exerce sur l'électron [$0{,}64 \times 10^{-15}$ N].

3. 02. — Calculer l'accélération de l'électron précédent [$0{,}7 \times 10^{15}$ m/s^2].

3. 03. — L'électron du 3.01 part de la plaque négative. Quelle est sa vitesse quand il arrive sur la plaque positive? [8 400 km/s].

3. 04. — Calculer le nombre d'électrons par seconde correspondant à un courant de 1 μA [$6{,}25 \times 10^{12}$].

3. 05. — Calculer l'énergie cinétique d'un électron dont la vitesse est $v = 10\,000$ km/s [$45{,}5 \times 10^{-18}$ J].

3. 06. — Quelle est l'énergie reçue en 1 seconde par une plaque bombardée par des électrons équivalents à un courant de 1 μA et dont la vitesse est de 10 000 km/s? [0,284 millijoule].

3. 07. — Un électron arrive avec une vitesse $v = 20\,000$ km/s dans une induction perpendiculaire à v et de valeur $B = 0{,}2$ mT. Quel est le rayon de la trajectoire? [0,57 m].

3. 08. — A quelle force l'électron précédent est-il soumis? (On effectuera le calcul par les deux formules.) [$0{,}64 \times 10^{-15}$ N].

3. 09. — Un électron pénètre avec une vitesse de 1 000 km/s dans un champ dont l'induction ($\perp$ à $\vec{V}$) est 0,2 millitesla. A quelle force est-il soumis? [32×10^{-18}N].

3. 10. — Quel est le rayon de la trajectoire décrite par l'électron précédent? [28,4 mm].

PROBLÈMES

I. AVEC SOLUTION.

3. 11. — Entre deux plaques distantes de 20 cm est appliquée une tension de 1 600 V. Le champ est supposé uniforme. Des électrons quittent la plaque négative avec une vitesse nulle. La plaque positive qui reçoit les électrons a une masse de 10 g et une chaleur spécifique $c = 400$ J/°C.kg. Calculer :

1° La force appliquée à un électron et l'accélération qu'elle lui communique.

2° La vitesse et l'énergie cinétique d'un électron à son arrivée sur la plaque.

3° La durée du parcours.

4° L'énergie calorifique dissipée en 1 mn sur la plaque sachant qu'elle reçoit 10^{14} électrons par seconde.

5° L'échauffement de la plaque.

— Solution —

1° Champ : $E = \dfrac{U}{d} = \dfrac{1\,600}{0{,}2} = 8\,000$ V/m.

Force : $F = qE = 1{,}6 \times 10^{-19} \times 8 \times 10^{3} = 1{,}28 \times 10^{-15}$ N.

Accélération : $\gamma = \frac{F}{m} = \frac{1{,}28\times10^{-15}}{0{,}91\times10^{-30}} = 1{,}4\times10^{15}$ m/s².

2° Vitesse : $\frac{1}{2}mv^2 = eU \Rightarrow v = 593\sqrt{U} = 593\sqrt{1\,600} = 23\,720$ km/s.

Énergie : $\frac{1}{2}mv^2 = eU = 1{,}6\times10^{-19}\times1\,600 = 256\times10^{-18}$ J.

3° Durée : $t = \frac{v}{\gamma} = \frac{23{,}72\times10^{6}}{1{,}4\times10^{15}} = 16{,}9\times10^{-9} = 16{,}9$ ns.

Vérification :

$$d = \frac{1}{2}\gamma t^2 = \frac{1}{2}\times1{,}4\times10^{15}\times16{,}9^2\times10^{-18} = 200\times10^{-3}\text{ m} = 20\text{ cm}.$$

4° Énergie reçue :

$$W = 256\times10^{-18}\times10^{14}\times60 = 1{,}536\text{ J}$$

Vérification : $i = Ne = 10^{14}\times1{,}6\times10^{-19} = 1{,}6\times10^{-5}$ A

$$W = Uit = 1\,600\times1{,}6\times10^{-5}\times60 = 1{,}536\text{ J}$$

5° Échauffement : $W = mc\Delta t$

$$\Delta t = \frac{W}{mc} = \frac{1{,}536}{10^{-3}\times400} = 0{,}384\ ^\circ\text{C}$$

Remarque. — Avec un courant de 1,6 mA (100 fois i) l'échauffement serait de 38,4 °C. On suppose évidemment qu'il n'y a pas de refroidissement.

3. 12. — Avec les résultats du problème précédent et en supposant que les lignes de champ sont horizontales, calculer la chute verticale due à la pesanteur.

— Solution —

L'action de la pesanteur se traduit par une chute verticale $h = \frac{1}{2}gt^2$ soit $h = \frac{1}{2}\times10\times16{,}9^2\times10^{-18} = 1{,}42\times10^{-15}m$ soit 0,00142 pm. Cette longueur est bien totalement négligeable.

3. 13. — Un électron est accéléré par une tension de 2 000 V. Quand il a atteint la vitesse correspondante appelée v il entre, dans un champ magnétique dont l'induction B = 1 mT est perpendiculaire à $\vec{V}$.

1° Quelle est la valeur v de la vitesse?

2° Calculer la force et l'accélération qui s'exercent sur l'électron quand il est dans le champ magnétique.

3° Déterminer le rayon R de la trajectoire à l'intérieur du champ.

4° Le champ ayant une largeur supérieure à R, avec quelle vitesse et suivant quelle direction l'électron en ressort-il?

5° Que se passe-t-il si la largeur du champ est inférieure à R?

— Solution —

1° Vitesse : $v = 593\sqrt{U} = 593\sqrt{2\,000} = 26\,600$ km /s.

2° Force :

$$F = evB = 1{,}6\times10^{-19}\times26{,}6\times10^{6}\times10^{-3} = 4{,}26\times10^{-15}\ \text{N}$$

$$\gamma = \frac{F}{m} = \frac{4{,}26\times10^{-15}}{0{,}91\times10^{-30}} = 4{,}7\times10^{15}\ \text{m/s}^2.$$

3° Rayon : $\gamma = \frac{v^2}{R} \Rightarrow R = \frac{v^2}{\gamma} = \frac{26{,}6^2\times10^{12}}{4{,}7\times10^{15}} = 0{,}15$ m.

4° L'électron ressort avec la même vitesse arithmétique parallèlement à sa direction d'entrée, dans le sens opposé, en un point A′ distant de 30 cm du point A d'entrée (fig. 39).

5° Si la distance des plans P et Q qui limitent le champ est inférieure à 15 cm le point A′ de sortie est à l'intersection de la trace de Q et de la trajectoire circulaire; à la sortie $\vec{V}$ est tangent à cette trajectoire (fig. 38).

II. A RÉSOUDRE.

3. 14. — Entre deux plaques distantes de 30 cm est appliquée une tension de 1 225 V. Le champ est supposé uniforme. Des électrons quittent la plaque négative avec une vitesse nulle. La plaque positive qui reçoit les électrons a une masse de 15 g et une chaleur spécifique de 250 J/°C.kg. Calculer :

1° La force, l'accélération, la vitesse et la durée du trajet de l'électron. On appliquera uniquement les lois de la mécanique.

2° L'énergie cinétique d'un électron :

a) en utilisant les résultats du 1°.

b) en utilisant la formule établie dans le cours.

3° L'élévation de température de la plaque après 1 mn de fonctionnement sachant qu'elle reçoit 10^{16} électrons par seconde.

3. 15. — Un électron est accéléré par une tension de 1 600 V. Quand il a atteint la vitesse correspondante appelée *v*, il entre dans un champ magnétique uniforme dont l'induction B = 0,5 mT est perpendiculaire à $\vec{V}$.

1° Calculer la force qui s'exerce sur l'électron quand il est dans le champ.

2° Déterminer l'accélération centripète et le rayon de la trajectoire.

3° Quelle largeur doit occuper le champ magnétique pour que, après la traversée, le vecteur vitesse $\vec{V}$ de l'électron à l'arrivée ait tourné de 60°?

3. 16. — Un électron arrive avec une vitesse $v = 10\,000$ km/s entre deux plaques chargées parallèles à $\vec{V}$ (fig. 35). Entre les deux plaques la tension est 100 V et la distance 2 cm. La longueur des plaques est $l = 1$ cm. Calculer :

1° La force à laquelle l'électron est soumis durant la traversée et l'accélération correspondante.

2° La durée de la traversée.

3° Le déplacement vertical subi par l'électron. Comparez ce déplacement à celui qui serait dû à la pesanteur agissant seule.

4° Le déplacement théorique pour des plaques longues de 10 cm. Que se passe-t-il en réalité?

4

OSCILLOGRAPHE

17. *Tube cathodique.*

1° **Définition.** — Un tube cathodique — on devrait dire tube à faisceau électronique — est un tube dans lequel le faisceau d'électrons peut être concentré en un point (spot), variable en position sur une surface sur laquelle il dessine une image visible.

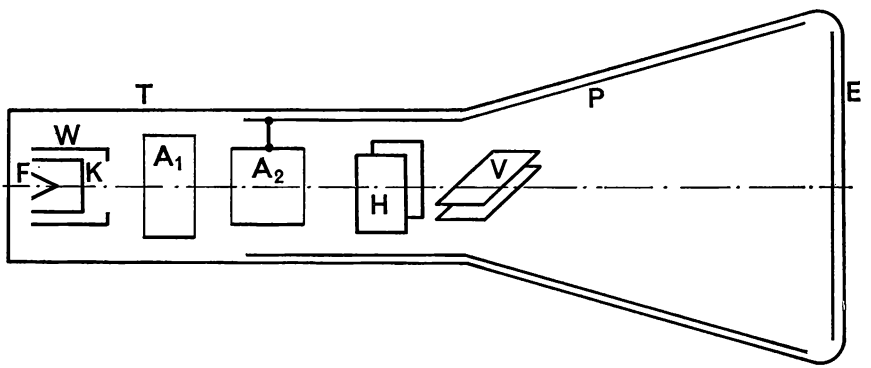


Fig. 40. — *Coupe d'un tube cathodique.*

2° **Description.** — La figure 40 montre l'intérieur d'un tube destiné à un oscillographe [1]. On y trouve :

T = Enveloppe en verre dont le vide est 10^{-6} mm de mercure.
F = Filament de chauffage de la cathode.
K = Cathode à oxydes.
W = Wehnelt ou grille.
A_1 = Anode de concentration.
A_2 = Anode d'accélération.
P = Pellicule conductrice intérieure au tube et reliée à l'anode A_2.

(1) On peut dire indifféremment oscilloscope ou oscillographe, voire « oscillo ».

E = Écran recouvert intérieurement d'une substance fluorescente et d'un mince film d'aluminium.

H = Plaques de déviation horizontale.

V = Plaques de déviation verticale.

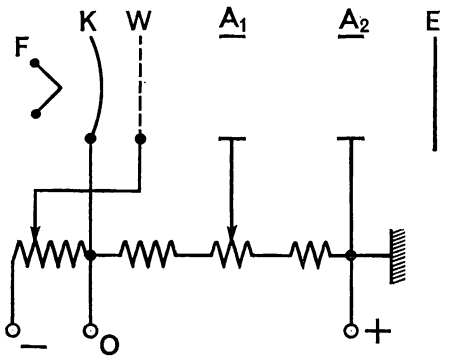


Fig. 41. — *Alimentation des électrodes.*

3° **Alimentation** (fig. 41). — Le potentiel de cathode étant pris pour zéro donnons quelques ordres de grandeur :

— Le Wehnelt est à un potentiel négatif réglable (0 à — 50 V).

— L'anode A_2 est à un potentiel positif fixe (1 500 V).

— L'anode A_1 est à un potentiel positif réglable (500 à 800 V).

C'est l'anode A_2 et la paroi métallisée du tube qui sont réunies à la masse, c'est-à-dire à toutes les parties métalliques qui constituent l'ossature de l'appareil. S'il n'en était ainsi il existerait un champ électrique important entre l'écran et la masse, ce champ influerait sur le comportement des électrons et la tension de l'anode par rapport à la masse constituerait un danger pour l'utilisateur.

18. *Rôle des différentes électrodes.*

1° **Fonctionnement du tube.** — Chauffée par le filament, la cathode émet des électrons qui sont accélérés par l'anode A_2. Cette dernière ayant la forme d'un anneau laisse passer les électrons et ceux-ci vont sur l'écran. Leur énergie sert en partie à y exciter la substance fluorescente; une tache lumineuse ou **spot** apparaît au point d'impact. Le reste de l'énergie sert à extraire du film d'aluminium qui recouvre l'écran des électrons secondaires qui rejoignent la pellicule conductrice P et par suite l'anode et la masse. **C'est donc grâce à l'émission secondaire que le circuit se referme** (fig. 42).

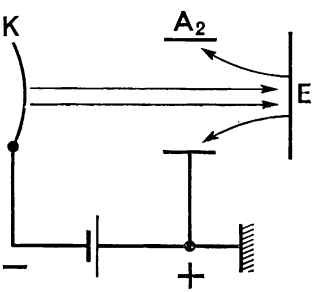


Fig. 42. — *L'émission secondaire d'électrons ferme le circuit.*

2° **L'anode d'accélération A_2.** — Elle communique aux électrons la vitesse $v_0 = 593 \sqrt{U}$. Quand ils ont dépassé cette anode leur mouvement devient uniforme.

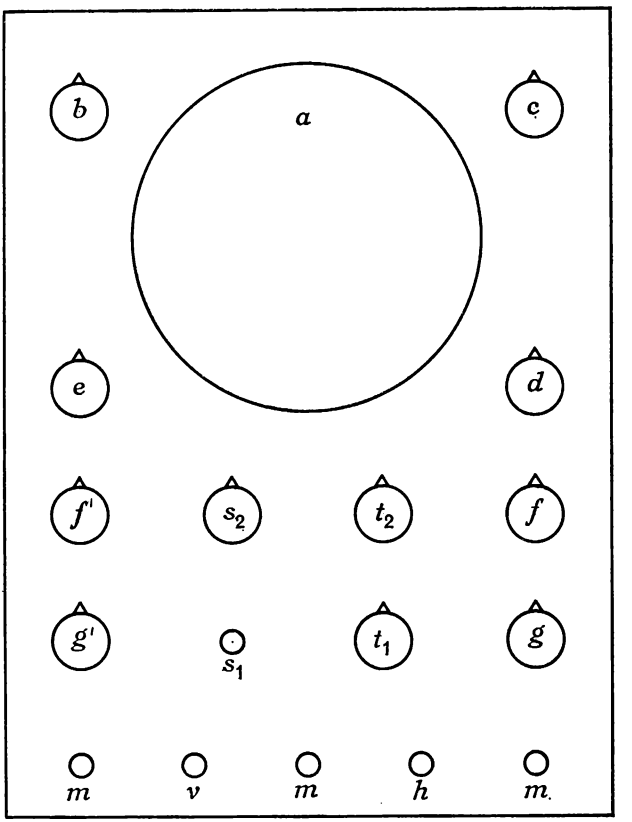


Fig. 43. — *Face avant d'un oscillographe*

a : écran — *b* : allumage et luminosité — *c* : concentration — *d* : cadrage horizontal — *e* : cadrage vertical — *f* et *g* : gain horizontal — *f'* et *g'* : gain vertical — t_1 et t_2 : base de temps — s_1 et s_2 : synchronisation — *m*, *h*, *v* : respectivement bornes d'entrée de masse, horizontale, verticale.

3° **Le Wehnelt.** — C'est d'abord une grille négative dont le rôle est de commander la quantité d'électrons c'est-à-dire la luminosité du spot. Son potentiel est réglé par action sur le potentiomètre **luminosité** (*b*)[1]

(1) Les petites lettres entre parenthèses renvoient à la figure 43.

qui sert en même temps d'interrupteur. Étant négatif, le Wehnelt agit également sur la concentration en repoussant les électrons vers l'axe du tube. Il est facile en tournant « *b* » de vérifier que l'augmentation de la luminosité s'accompagne d'une dispersion.

4° **L'anode de concentration A_1.** — Son potentiel étant inférieur à celui de A_2, il y aura entre les deux anodes un champ électrique. Quand

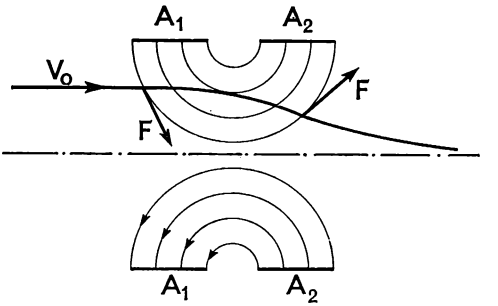


Fig. 44. — *Focalisation des électrons.*

un électron arrive dans ce champ il est soumis à des forces qui modifient sa trajectoire (fig. 44). Par action sur le potentiomètre (*c*) on change le potentiel de A_1, la valeur du champ électrique est modifiée ainsi que la trajectoire des électrons. On peut de cette façon créer la coïncidence

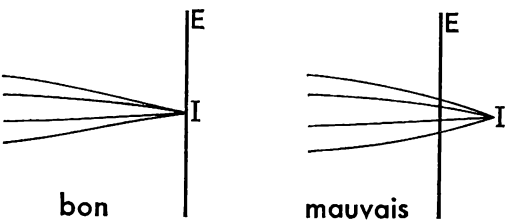


Fig. 45. — *Réglages du faisceau.*

entre le centre de l'écran et le point I où les différents rayons électroniques se recoupent. Cette opération est une véritable **focalisation** du faisceau analogue à celle des rayons lumineux en optique. Le point I est l'image de la source d'électrons, les anodes A_1 et A_2 constituent une **lentille électronique.** Le bouton (*c*) est appelé **concentration** ou **focalisation.** En le tournant on vérifiera son action (fig. 45).

5° **Écran.** — Il est recouvert d'une substance fluorescente qui s'illumine quand elle reçoit le faisceau d'électrons : sulfure de zinc, de cuivre, silicate de zinc ou tungstate de calcium [1]. La substance est elle-même recouverte d'un film d'aluminium suffisamment mince pour être traversé par les électrons. C'est de ce film que sont extraits les électrons secondaires (fig. 46).

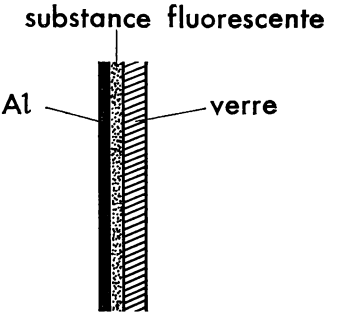


Fig. 46. — *Constitution de l'écran.*

19. *Déviation électrostatique.*

1° **Plaques de déviation ou de déflection.** — Il en existe deux paires H et V (fig. 40). Lorsqu'une tension est appliquée entre les deux plaques d'une même paire, le champ électrique créé développe une force sur chaque électron et le faisceau est dévié vers la plaque positive (chap. 3, § 15) perpendiculairement à l'orientation des plaques. **C'est pourquoi les plaques H placées verticalement sont dites horizontales :** elles portent le nom de la déviation qu'elles produisent. De même les plaques V sont placées horizontalement.

2° **Calcul de la déviation.** — a) *Hypothèses.* — Le champ électrique est supposé uniforme et strictement limité à l'espace compris entre les plaques.

b) *Notations.* — Soit $\vec{V}_0$ la vitesse de l'électron à son arrivée dans le champ, cette vitesse est supposée perpendiculaire aux lignes de force du champ : $\vec{V}_0 \perp \vec{E}$. Les plaques de longueur l sont séparées par une distance d et soumises à une tension V. Le champ est donc $E = \frac{V}{d}$.

c) *Analyse du mouvement.* — L'électron soumis dès son arrivée dans le champ à une force $\vec{F}$ perpendiculaire à $\vec{V}_0$ aura à l'intérieur des plaques un **mouvement parabolique d'axe** Ay. Quand il quitte le champ en C, son **mouvement redevient rectiligne et uniforme.** A la sortie des plaques il a subi une déviation $y = A'C$ (fig. 47).

d) *Calcul de y.* — Durée de la traversée ; $t = \frac{l}{v_0}$

(1) C'est un produit analogue qui rend lumineux les cadrans des montres et des réveille-matins.

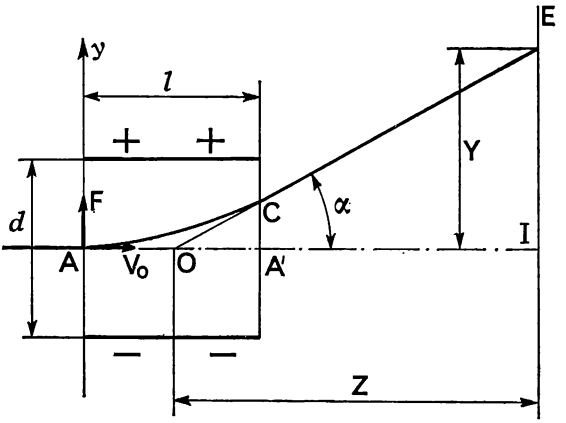


Fig. 47. — *Déviation électrostatique.*

déplacement y : $\quad y = \frac{1}{2}\gamma t^2$ avec $\gamma = \frac{f}{m} = \frac{eE}{m}$

$$y = \frac{1}{2} \times \frac{eE}{m} \times \left(\frac{l}{v_0}\right)^2 = \frac{eEl^2}{2mv_0^2}$$

Soit U la tension de lancement, on sait que $\frac{1}{2}mv_0^2 = eU$ et y devient en remplaçant E par $\frac{V}{d}$:

$$y = \frac{eEl^2}{2 \times 2\,eU} = \frac{El^2}{4\,U} = \frac{Vl^2}{4\,Ud}$$

e) *Déviation angulaire.* — En C, l'électron sort tangentiellement à la parabole ; or la tangente en C recoupe la tangente au sommet AI au milieu O de AA'. On a donc :

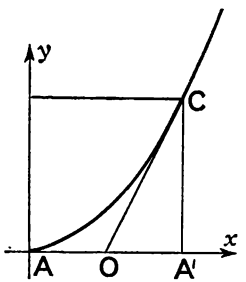


Fig. 48. — *Propriété de la tangente à la parabole.*

$$\text{tg}\alpha = \frac{A'C}{OA'} = \frac{y}{\frac{l}{2}} = \frac{2y}{l}$$

soit

$$\text{tg}\alpha = \frac{\frac{2Vl^2}{4\,Ud}}{l} = \frac{Vl}{2\,Ud}$$

Remarque. — Établissons la propriété de la tangente (fig. 48). Soit $y = ax^2$ l'équation d'une parabole et C un point de coordonnées x_0 et $y_0 = ax_0^2$. La tangente OC en C a pour pente $y_0' = 2ax_0$ et pour équation : $y - y_0 = y_0'(X - x_0)$. Elle recoupe Ax en un point O d'ordonnée nulle : $-y_0 = y_0'(X - x_0)$.

Soit $-ax_0^2 = 2ax_0 (X - x_0) \Rightarrow -x_0 = 2(X - x_0$ et $X = \frac{x_0}{2}$. Le point O est bien le milieu de AA'.

f) *Déviation sur l'écran.* — Si Z est la distance OI du centre O des plaques à l'écran et Y la déviation sur l'écran :

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{Y}{Z} \text{ ce qui donne}$$

$$\frac{Y}{Z} = \frac{Vl}{2Ud} \quad \Rightarrow \quad Y = \frac{VlZ}{2Ud}$$

$$\textbf{(10)} \qquad \boxed{Y = \frac{lZ}{2d} \times \frac{V}{U}}$$

l, Z, d et Y avec la même unité
V et U en volts

Les trois longueurs l, Z et d ont évidemment été choisies à la construction donc :

→ La déviation électrostatique d'un tube de géométrie donnée ne dépend que du rapport $\frac{V}{U}$ de la tension de déviation à la tension de lancement.

En outre, lorsque la tension U d'accélération est fixée, V reste la seule variable :

La déviation Y sur l'écran est proportionnelle à la tension déviatrice V.

REMARQUE. — La formule 10 est également valable pour une déviation horizontale.

3° Sensibilité d'un tube. — C'est le **rapport** $s = \frac{Y}{V}$ de la déviation à la tension qui l'a produite. On l'exprime en mm/V. Le plus souvent les constructeurs donnent le rapport inverse $\frac{1}{s} = \frac{V}{Y}$ en V/mm ou en V/cm. Un tube est d'autant plus sensible que s est plus grand. Notons que cette sensibilité se trouve fixée à la construction :

$$s = \frac{Y}{V} = \frac{lZ}{2Ud}$$

REMARQUE. — Cette valeur est la sensibilité directe, celle qui correspond à l'attaque des plaques de déviation sans passer par les amplificateurs d'entrée.

20. *Balayage.*

1° But. — L'une des utilisations principales d'un oscillographe est l'observation d'un phénomène en fonction du temps. Il est donc nécessaire de tracer sur l'écran un axe horizontal où les abscisses devront être proportionnelles aux intervalles de temps.

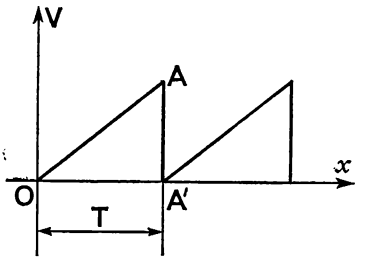


Fig. 49. — *Tension de balayage.*

2° Fonctionnement. — On applique aux plaques H une tension périodique de balayage en dents de scie (fig. 49). De O à A la tension est proportionnelle au temps et il en sera de même de la déviation (formule 10). De A à A′ la tension s'annule presque instantanément et le spot revient à sa position de départ.

Le spot décrit l'axe horizontal de gauche à droite et à vitesse constante.

3° Possibilités. — Deux boutons t_1 et t_2 permettent de faire varier la vitesse de balayage c'est-à-dire la durée d'un trajet horizontal du spot. Sur un bon appareil la gamme des périodes s'étend de 1 s à 1 µs environ.

21. *Observation d'un phénomène périodique.*

1° Application d'une tension continue V entre *m* et *v* (sans balayage). — Le spot subi un déplacement vertical $d = sV$.

EXEMPLE : $s = 0{,}1$ mm/V, $V = 25$ V $\Rightarrow d = 2{,}5$ mm.

Avec balayage : le spot décrit une droite parallèle à l'axe horizontal à la distance $d = sV$ (fig. 50).

2° Application sans balayage d'une tension sinusoïdale entre *m* et *v*. — Le spot animé d'un mouvement sinusoïdal vertical décrit une droite (fig. 51). La demi-longueur de cette droite est proportionnelle à la valeur maximale U_m de la tension.

3° **Observation d'une tension sinusoïdale avec balayage.** — La trajectoire du spot résulte de la composition de deux mouvements rectilignes :

— un mouvement horizontal uniforme ;

— un mouvement vertical sinusoïdal.

La trajectoire résultante est sinusoïdale (fig. 52).

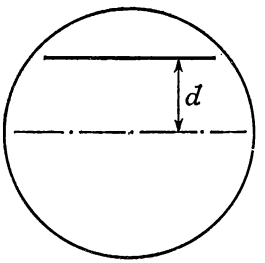


Fig. 50.

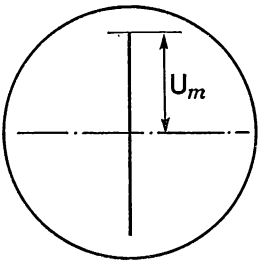


Fig. 51.

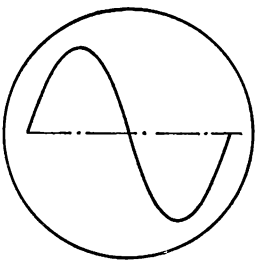


Fig. 52.

4° **Observation d'un phénomène quelconque.** — Le phénomène doit toujours être transformé en tension. En particulier, pour observer un courant i il faut lui faire produire une chute de tension Ri dans une résistance pure. Le spot trace la courbe $u = f(t)$ de la tension appliquée entre les bornes m et v.

5° **Synchronisation.** — Si les fréquences du phénomène et du balayage ne sont pas dans un rapport simple la courbe est instable. On obtiendra la synchronisation en établissant un léger couplage entre la tension V et le balayage par l'intermédiaire de la borne s_1 et du potentiomètre s_2 (fig. 43).

22. *Autres réglages du tube.*

1° **Plaques de déviation.** — Elles doivent être reliées à la masse directement ou par l'intermédiaire de résistances élevées.

a) *Attaque asymétrique.* — Une plaque de chaque paire est directement reliée à la masse (fig. 53). Le signal est appliqué à l'autre plaque.

b) *Attaque symétrique.* — Aucune plaque n'est directement à la masse (fig. 54).

2° **Positionnement du spot.** — Deux boutons dits de cadrage (*d*) et (*e*) permettent de placer le spot en un point quelconque de l'écran en modifiant le potentiel de la plaque non reliée à la masse (fig. 55).

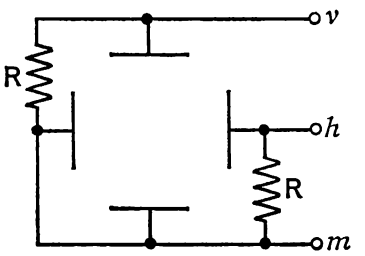


Fig. 53. — *Plaques asymétriques.*

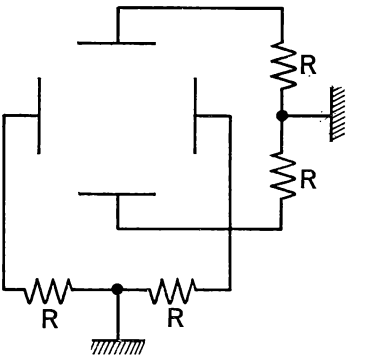


Fig. 54. — *Plaques symétriques.*

3° **Amplificateurs d'entrée.** — Si la tension à observer est trop faible on l'amplifie avant son envoi sur les plaques. C'est le rôle des boutons *f* et *g* pour l'entrée verticale et *f'* et *g'* pour les plaques horizontales. La sensibilité de l'appareil est alors supérieure à la sensibilité directe.

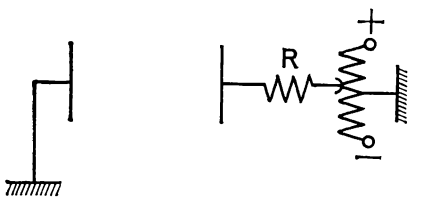


Fig. 55. — *Cadrage.*

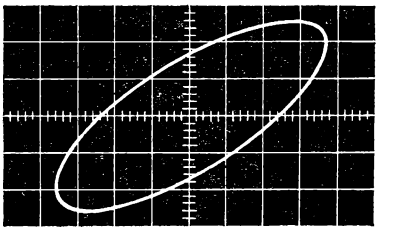
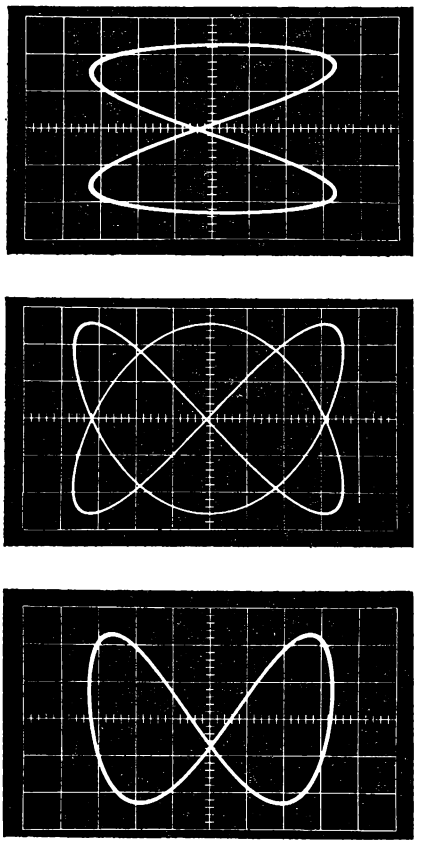


Fig. 56.

23. *Utilisation en Lissajous.*

1° **Comparaison de tensions.** — Pour comparer deux tensions de même fréquence on élimine le balayage (bouton t_2) et on applique une des tensions sur les plaques horizontales et l'autre sur les plaques

verticales. Le spot décrit une ellipse [1] (fig. 56). Pour une même sensibilité horizontale et verticale le rapport des côtés du rectangle circonscrit est égal au rapport des tensions.



Rapport des fréquences

$\frac{1}{2}$

$\frac{3}{2}$

2

Fig. 57. — *Courbes de Lissajous.*

2° **Comparaison de fréquences.** — Avec deux tensions de fréquences différentes on obtient des courbes de Lissajous de formes variées (fig. 57). On démontre que le rapport des fréquences est égal au rapport inverse des nombres de points de tangence entre la courbe et le rectangle dans lequel elle est inscrite :

$$\frac{f_v}{f_h} = \frac{\text{nombre de points horizontaux}}{\text{nombre de points verticaux}}$$

(1) Avec la diagonale du rectangle comme cas particulier (tensions en phase on en opposition).

24. *Oscillographe bicourbe.*

1° **Commutateur électronique.** — Il est destiné à mettre les plaques verticales alternativement en contact avec deux entrées séparées V_1 et V_2. Une image grossière du fonctionnement nous en est donné par un commutateur tournant (fig. 58). La fréquence de commutation peut dépasser le mégahertz. Les courbes correspondant aux deux entrées sont tracées successivement sur l'écran, la **persistance** des impressions lumineuses sur la rétine et la **rémanence** (1) du tube assurent la vision simultanée des deux courbes.

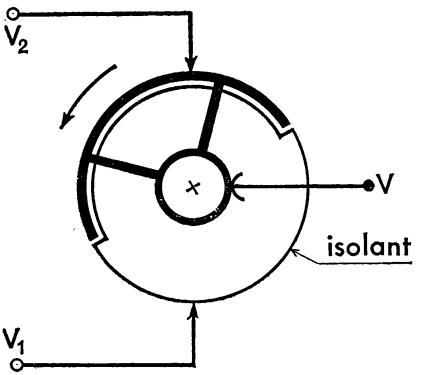


Fig. 58. — *Commutateur tournant.*

2° **Oscillographe bicourbe.** — Il possède un seul canon électronique. Un commutateur électronique permet l'observation des deux courbes.

3° **Oscillographe bifaisceau** (fig. 59). — Les deux faisceaux sont en général créés par deux canons différents, à chacun d'eux correspond une paire de plaques verticales et les deux faisceaux tracent simultanément les courbes sur l'écran. En adjoignant à chaque faisceau un commutateur électronique on pourra observer quatre courbes en même temps.

25. *Déviation magnétique.*

1° **Rappel.** — Lorsqu'un électron pénètre dans un champ magnétique uniforme avec une vitesse $\vec{V}$ perpendiculaire à l'induction, il est soumis à une force $F = Bev$ perpendiculaire à $\vec{V}$ et à $\vec{B}$, et est animé d'un mouvement circulaire uniforme de rayon $R = \frac{mv}{eB}$ (chap. 3, § 16).

(1) La fluorescence de l'écran persiste quelques fractions de seconde après le passage du spot.

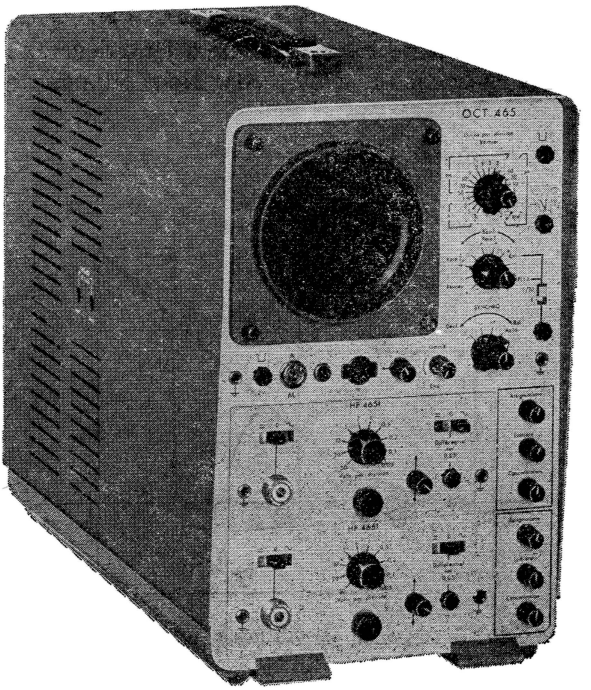


Photo C.R.C. Saint-Étienne.

Fig. 59. — *Oscillographe bifaisceau.*

2° **Bobines de déviation.** — Les plaques de déviation du tube sont supprimées et remplacées par des bobines placées à l'extérieur du tube. Il y a deux paires de bobines dont les axes sont perpendiculaires. Les bobines placées horizontalement produisent une induction verticale et une déviation horizontale (fig. 60).

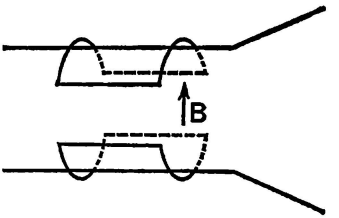


Fig. 60. — *Bobines de déviation horizontale.*

3° **Calcul de la déviation.** — *a*) Nous supposons que le champ produit est uniforme et strictement limité à l'espace compris entre les bobines.

b) Soient l la longueur des bobines et B l'induction produite. Les autres notations sont celles de la déviation électrostatique.

c) *Analyse du mouvement.* — L'électron arrive en A dans le champ avec une vitesse $\vec{V}_0$, sa trajectoire circulaire à l'intérieur du champ redevient rectiligne à la sortie en C (fig. 61). Nous supposons que $l \ll R$.

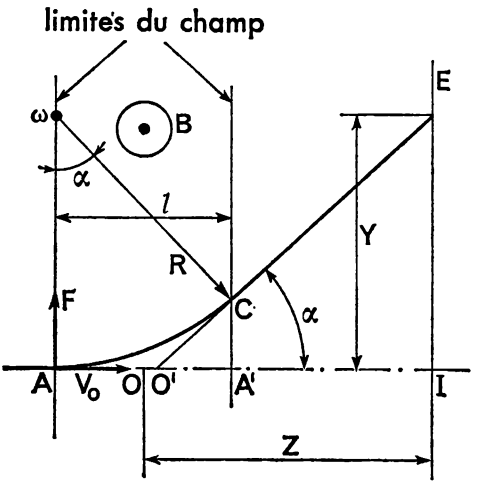


Fig. 61. — *Déviation magnétique* (α *est très exagéré*).

ou ce qui revient au même que l'angle α (radian) est petit devant l'unité. On obtient alors les approximations suivantes:

Le point O′ où la tangente en C à l'arc de cercle recoupe AI est pratiquement confondu avec le milieu O de AA′:

$$O'I \simeq OI = Z \quad \text{et} \quad \operatorname{tg}\alpha \simeq \alpha \simeq \frac{Y}{Z}$$

L'arc $\widehat{AC} = R\alpha$ est pratiquement égal à l: $R\alpha \simeq l \Rightarrow \alpha \simeq \dfrac{l}{R}$.

On obtient donc l'égalité $\alpha = \dfrac{l}{R} = \dfrac{Y}{Z}$

soit avec $R = \dfrac{mv}{eB}$, $Y = \dfrac{Zl}{R} = \dfrac{ZleB}{mv}$

Si la tension d'accélération est U on a $eU = \dfrac{1}{2} mv_0^2$ soit $v_0 = \sqrt{\dfrac{2eU}{m}}$

il vient:

$$Y = \frac{ZleB}{m\sqrt{\dfrac{2eU}{m}}} = \frac{ZlB\sqrt{e}}{\sqrt{2mU}} = \sqrt{\frac{e}{2m}} \times Zl \times \frac{B}{\sqrt{U}}$$

avec $\frac{e}{2m} = \frac{1{,}76 \times 10^{11}}{2} = 8{,}8 \times 10^{10}$ et $\sqrt{\frac{e}{2m}} = 2{,}97 \times 10^{5} \simeq 3 \times 10^{5}$

(11) $$\boxed{Y = 3 \times 10^{5} \times Z l \times \frac{B}{\sqrt{U}}}$$ B en teslas, U en volts, Z, l et Y en mètres

Z et l étant fixés à la construction, la déviation ne dépend que du rapport $\frac{B}{\sqrt{U}}$ et pour U donné, la déviation est proportionnelle à B.

26. *Tube d'un récepteur de télévision.*

1° **Aspect.** — Pour réduire l'encombrement on a cherché à le raccourcir; pour agrandir l'image on a augmenté le diamètre de l'écran. Finalement le tube est beaucoup plus « ramassé » qu'un tube d'oscillographe. Actuellement l'angle d'ouverture est de 110° (fig. 62).

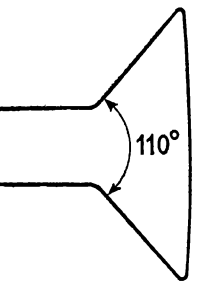


Fig. 62.

2° **Choix du système de déviation.** — On doit obtenir une grande déviation sur une courte distance. La déviation magnétique est préférable puisque inversement proportionnelle à $\sqrt{U}$ (au lieu de U pour la déviation électrostatique). Signalons que souvent la concentration est également obtenue par voie magnétique.

EXERCICES

4. 01. — On applique une tension continue de 10 V sur les plaques V d'un oscillographe. Le spot se déplace de 5 cm. Quelle est la sensibilité? [5mm/V].

4. 02. — On applique une tension sinusoïdale de valeur efficace 2 V sur l'oscillographe précédent. Quelle est la longueur de la droite observée? [28,3 mm].

4. 03. — On applique une tension sinusoïdale de 3 V efficaces sur les plaques horizontales et une tension inconnue U sur les plaques verticales. L'ellipse observée est inscrite dans un rectangle de 6 cm de largeur et de 4 cm de hauteur. Calculer U sachant que les sensibilités verticales et horizontales sont égales [2 V].

4. 04. — Même question avec $\frac{s_v}{s_h} = 2$ [1 V].

4. 05. — Calculer avec la formule 10 et en mm/V la sensibilité verticale d'un oscillographe pour chaque jeu de valeurs (la réponse est donnée pour la première ligne).

l (mm)	Z (mm)	d (mm)	U (V)	$s = \frac{Y}{V}$
20	200	5	1 000	0,4
25	150	10	1 200	
15	180	8	1 500	
18	120	6	800	

4. 06. — Calculer la déviation magnétique d'un tube pour chaque jeu de valeurs (la réponse est donnée pour la première ligne).

Z (mm)	l (mm)	B (mT)	U (V)	Y (mm)
200	40	5	2 500	240
180	30	10	5 000	
150	25	20	8 100	
220	35	25	10 000	

PROBLÈMES

I. AVEC SOLUTION.

4. 07. — Le tube à déviation électrostatique d'un oscillographe est alimenté sous une tension d'accélération de 1 600 V. Les plaques de déviation ont 25 mm de longueur et sont distantes de 8 mm. La distance de leur centre à l'écran est Z = 250 mm, le diamètre de celui-ci est 130 mm.

1° Calculer la vitesse communiquée aux électrons.

2° Quelle tension maximale peut-on appliquer entre plaques pour que les électrons ne soient pas arrêtés par celles-ci?

3° Calculer la sensibilité du tube.

4° Quelle tension sinusoïdale doit-on appliquer sur les plaques pour avoir la déviation maximale sur l'écran?

5° On remplace les plaques par un système de déviation magnétique agissant également sur une longueur de 25 mm. Quelle est la valeur efficace de l'induction sinusoïdale qui donne la déviation maximale?

— Solution —

1° Vitesse : $\frac{1}{2} mv^2 = eU$ soit $v = 593 \sqrt{U}$

$$v = 593 \times 40 = 23\,720 \text{ km/s}$$

2° L'écartement des plaques est 8 mm, la déviation à la sortie doit être au plus égale à 4 mm.

Durée de la traversée : $t = \frac{l}{v} = \frac{25 \times 10^{-3}}{23\,720 \times 10^3} = 1{,}05 \times 10^{-9}$ s

la déviation est $y = \frac{1}{2} \gamma t^2$ avec $\gamma = \frac{eE}{m} = \frac{eV}{md}$ où V est la tension cherchée et $y = 4$ mm.

$$y = \frac{1}{2} \frac{eVt^2}{md}$$

$$V = \frac{2ymd}{et^2} = \frac{2 \times 4 \times 10^{-3} \times 0{,}91 \times 10^{-30} \times 8 \times 10^{-3}}{1{,}6 \times 10^{-19} \times 1{,}05 \times 1{,}05 \times 10^{-18}}$$

$$V = \frac{582}{1{,}76} = 330 \text{ V.}$$

3° La sensibilité est $s = \frac{Y}{V} = \frac{lZ}{2dU}$

$$s = \frac{25 \times 10^{-3} \times 0{,}25}{2 \times 8 \times 10^{-3} \times 1\,600} = 0{,}244 \times 10^{-3} \text{ m/V} = 0{,}244 \text{ mm/V.}$$

4° La déviation maximale est égale au diamètre du tube : 130 mm. A cette déviation correspond 2 fois U_m :

$$2U_m = \frac{130}{0{,}244} = 533 \text{ V soit } U_m = 266{,}5 \text{ V et}$$

$$U = \frac{266{,}5}{1{,}414} = 188 \text{ V.}$$

5° On doit avoir $Y = 130$ mm pour le double de l'induction maximale :

$$0{,}13 = 3 \times 10^5 \times \frac{Zl \times 2B_m}{\sqrt{U}}$$

$$B_m = \frac{0{,}13 \sqrt{U}}{6 \times 10^5 Zl} = \frac{0{,}13 \times 40}{6 \times 10^5 \times 0{,}25 \times 25 \times 10^{-3}}$$

$$B = \frac{5{,}2}{37{,}5 \times 10^3} \rightarrow 1{,}39 \text{ mT}$$

et la valeur efficace $B = \frac{1{,}39}{1{,}414} \simeq 1$ mT.

II. A RÉSOUDRE.

4. 08. — Dans un tube cathodique la vitesse atteinte par les électrons est égale à 40 000 km/s.

1° Calculer la tension entre anode et cathode.

2° Le faisceau est concentré sur une plaque métallique de 1 mm d'épaisseur et de 1 cm^2 de section. La température de la plaque s'élève de 1 750 °C en une minute. Sachant que la masse volumique du métal est 21 400 kg/m^3 et sa chaleur massique 145 J/°C.kg, calculer le nombre d'électrons qui traversent le tube et l'intensité du courant correspondant.

3° La plaque métallique est supprimée et le faisceau passe entre deux plaques parallèles longues de 2 cm, la force appliquée à un électron est alors $F = 18 \times 10^{-15}$ N. La distance du centre des plaques à l'écran est de 24 cm. Calculer :

a) Le champ électrique existant entre les plaques.

b) La déviation angulaire à la sortie des plaques et la déviation linéaire sur l'écran. (D'après baccalauréat, Bordeaux, 1952.)

On rappelle : $e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C et $m = 0{,}91 \times 10^{-30}$ kg.

4. 09. — Dans un tube cathodique la tension anode-cathode est $U = 22\,500$ V.

1° Calculer l'énergie cinétique d'un électron.

2° Le faisceau électronique aboutit sur une plaque dont la masse est 3 g et la chaleur massique 200 J/° C.kg. Le courant étant de 80 μA, calculer l'échauffement de la plaque en 30 s.

3° La plaque étant supprimée le faisceau subit, sur une longueur de 20 cm, l'action d'un champ électrique de 600 V/m perpendiculaire à la vitesse des électrons. Calculer la déviation angulaire du faisceau à la sortie du champ.

4. 10. — Un oscillographe est alimenté par une tension anodique de 1 200 V. Le système de déviation horizontale est formé de plaques parallèles longues de 3 cm et distantes de 1 cm. La distance du centre des plaques à l'écran est 20 cm.

1° Exprimer la déviation en fonction de la tension V appliquée aux plaques et calculer la sensibilité horizontale.

2° Le diamètre de l'écran est 100 mm, quelle amplitude faut-il donner à la tension de balayage pour que le spot décrive tout l'écran?

3° Les plaques verticales sont identiques aux plaques horizontales, on veut observer une tension sinusoïdale de valeur efficace 120 V, dans quel rapport faut-il la réduire pour que la hauteur d'une alternance de la courbe soit 4 cm?

4° L'appareil est utilisé en Lissajous avec attaque directe sur les plaques (pas d'amplification), on observe une ellipse inscrite dans un rectangle de 8 cm de large et 5 cm de haut. Calculer les deux tensions affichées.

5

COURANT DANS LES SOLIDES

27. *Mécanisme de la conduction dans les solides.*

1° Nous connaissons la nature du courant dans le vide, nous nous proposons d'apporter quelques précisions à la nature du courant dans les solides cristallisés.

2° **Structure des solides.** — Les corps simples cristallisés (à l'état solide) ne sont pas formés de molécules. Un cristal est un arrangement régulier d'atomes liés entre eux par covalence c'est-à-dire mise en commun d'électrons (chap. 1). Ces liaisons donnent au solide sa rigidité. Les électrons qui y participent sont des **électrons liés.** Les électrons excédentaires, **s'il en existe,** sont des **électrons libres :** ils circulent en tout sens dans le solide (agitation désordonnée) mais ne peuvent le quitter sans apport d'énergie. Nous savons comment peut se faire cet apport ; par émission thermoélectronique, par émission secondaire, par champ électrique ou par radiation électromagnétique (chap. 2).

3° **Mouvement des électrons libres dans un champ électrique.** — Si l'on applique une différence de potentiel entre les extrémités d'un solide comportant des électrons libres, à l'agitation désordonnée se superposera un mouvement d'ensemble vers le pôle positif et il en résultera un courant de sens contraire (fig. 63). Il n'y aura aucun effet apparent sur les électrons liés.

Les électrons placés dans le champ $\vec{E}$ dû à la d.d.p. sont soumis à une force constante $\vec{F} = q\vec{E} = -e\vec{E}$ et l'on pourrait croire que leur mouvement sera uniformément accéléré comme dans le vide, il n'en est rien. Alors que dans le vide il n'y a aucun obstacle, **dans un solide les électrons subissent de nombreux chocs** (origines de l'effet joule) et, après une brève et faible accélération au départ, **leur mouvement devient uniforme** [1].

Dans un solide la vitesse des électrons est constante.

(1) Comme devient uniforme à cause de la résistance de l'air le mouvement de descente d'un parachute ou d'une goutte d'eau.

4° **Calcul de la vitesse.** — Soit un solide de section constante S et v la vitesse des électrons. Les électrons libres contenus entre les plans P et P′ d'éloignement l (fig. 64) auront tous traversé P′ au bout du temps $t = \frac{l}{v}$. La charge Q transportée par tous ces électrons aura produit un courant $I = \frac{Q}{t}$.

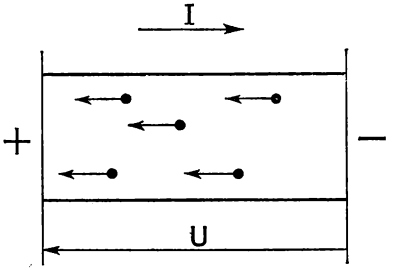


Fig. 63.

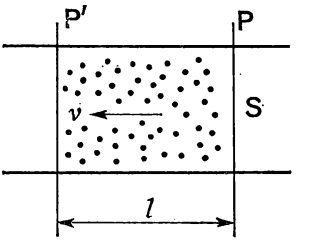


Fig. 64.

Calculons Q. — Soit n le nombre d'électrons par unité de volume, le nombre d'électrons contenus entre P et P′ est :

$$n' = n \times \text{volume} = nl\text{S}$$

La charge totale est : $Q = n'e = nl\text{S}e$.

Le courant est ; $I = \frac{nl\text{S}e}{t} = nv\text{S}e$

(12) $\boxed{I = v\,e\,n\,S}$

v en m/s
$e = 1{,}6 \times 10^{-19}$C
n en élect./m³
S en m²
I en ampères

Inversement la vitesse est $v = \frac{I}{en\text{S}}$.

Cette vitesse est une **vitesse moyenne des électrons dans le sens opposé au champ** et non la vitesse propre d'un électron particulier.

28. *Conductivité d'un solide.*

1° **Loi d'Ohm.** — Transformons la formule $I = \frac{U}{R}$, d'une part le champ électrique est $E = \frac{U}{l}$, d'autre part on a $R = \frac{\rho l}{S}$.

$$I = \frac{US}{\rho l} = \frac{ES}{\rho} \quad \text{soit} \quad \frac{I}{S} = \frac{E}{\rho}$$

Rappelons que la densité de courant est [1] $J = \frac{I}{S}$ et que la conductivité est $\gamma = \frac{1}{\rho}$.

$$\boxed{J = \frac{E}{\rho} = \gamma E}$$

E en volts
ρ en Ωm
γ en $\Omega^{-1}m^{-1}$
J en A/m^2

Cette formule est la **loi d'Ohm réduite** ou **loi d'Ohm spécifique.**

2° **Mobilité des électrons.** — La formule 12 écrite $\frac{I}{S} = J = ven$ et la loi d'Ohm : $J = \gamma E$ donnent :

$$J = ven = \gamma E \quad \Rightarrow \quad \gamma = \frac{ven}{E}$$

La conductivité est proportionnelle au nombre d'électrons par m^3 et au rapport $\frac{v}{E}$ (e étant constant).

Définition. — Le rapport $\mu = \frac{v}{E}$ est appelé **mobilité des électrons.**

$$\boxed{\mu = \frac{v}{E}}$$

v en m/s
E en V/m
μ en $m^2/V.s$

La conductivité peut s'écrire $\gamma = \mu en$

(13) $$\boxed{\gamma = \mu en}$$

μ en $m^2/V.s$
$e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C
n élect./m^3
γ en $\Omega^{-1}m^{-1}$

3° **Généralisation.** — Cette formule établie pour les électrons est également valable pour des charges positives. Les particules positives ou négatives qui sont à l'origine du courant sont appelées : **porteurs de charge.**

Dans un champ électrique les déplacements des porteurs positifs et négatifs sont de sens contraires mais correspondent à un courant de

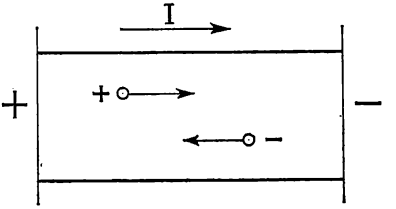


Fig. 65. — *Les deux déplacements produisent un courant de même sens.*

(1) Nous écrivons J pour la densité en A/m^2 et conservons Δ pour la densité pratique en A/mm^2. On a : $J = \Delta \times 10^6$.

même sens (fig. 65). Le courant total est donc la somme arithmétique des courants produits séparément par les deux sortes de porteurs, la densité de courant aussi [1] :

$$J = J_n + J_p = \gamma_n E + \gamma_p E = E\ (\gamma_n + \gamma_p)$$

La conductivité est la somme des conductivités n (négative) et p (positive) :

$$\gamma = \gamma_n + \gamma_p = \mu_n e n + \mu_p e p$$

(13 *bis*) $\boxed{\gamma = e(n\mu_n + p\mu_p)}$

en notant p le nombre de porteurs positifs par m^3 et, μ_n et μ_p, les mobilités.

29. *Conducteurs.*

1° Rappel de propriétés. — La résistivité des bons conducteurs (métaux et alliages) est faible, elle s'échelonne entre 10^{-8} et 100×10^{-8} Ωm. Leur conductivité est donc comprise entre 10^8 et 10^6. Les métaux et alliages ont un coefficient de température positif ; leur résistivité et leur résistance croissent avec la température, pour le cuivre $a \simeq 0{,}004$. A température constante la résistance d'un conducteur est invariable, en particulier elle ne dépend pas de la tension qui lui est appliquée.

2° Le nombre d'électrons libres d'un métal ne dépend pas de sa température. — Pour assurer la cohésion des métaux il y a surabondance d'électrons : **un électron, au moins, par atome de métal est toujours libre,** l'énergie à fournir pour libérer cet électron est donc nulle. Le nombre d'électrons libres par unité de volume est le même quelle que soit la température. Si la résistivité augmente avec cette dernière c'est à cause de l'accroissement de l'agitation désordonnée et des chocs qui en résultent.

REMARQUE. — Dans les métaux, il n'y a pas de porteurs positifs.

3° Vitesse des porteurs. — Calculons un ordre de grandeur de la vitesse moyenne des électrons du cuivre dans le sens du champ.

Cuivre : masse atomique 64 g, masse volumique 8 800 kg/m^3.

Dans 64 g il y a 6×10^{23} électrons (1 par atome).

(1) L'indice n se rapporte aux porteurs négatifs et l'indice p aux positifs.

Dans 1 m³ : $n = \dfrac{6\times10^{23}\times 8\,800}{64\times10^{-3}} = 8{,}25\times10^{28}$.

Vitesse : $v = \dfrac{I}{enS} = \dfrac{J}{en}$ avec $ne = 8{,}25\times10^{28}\times1{,}6\times10^{-19} = 1{,}32\times10^{10}$

d'où

$$v = \frac{J}{1{,}32\times10^{10}}$$

Pour une densité de courant raisonnable $\Delta = 5$ A/mm², soit $J = 5\times10^{6}$ A/m²,

$$v = \frac{5\times10^{6}}{1{,}32\times10^{10}} = 3{,}8\times10^{-4}\ \text{m/s} = 0{,}38\ \text{mm/s}$$

Les électrons parcourent 33 m.... en une journée!

4° **Mobilité.** — Nous pouvons la calculer (à 0 °C) :

$$\mu = \frac{\gamma}{en} = \frac{1}{\rho en} = \frac{1}{1{,}6\times10^{-8}\times1{,}32\times10^{10}} = 4{,}74\times10^{-3}$$

C'est une valeur assez faible.

La bonne conductibilité du cuivre est due au très grand nombre de porteurs et non à leur mobilité.

30. *Isolants.*

1° **Rappel de propriétés.** — Les isolants ont une très grande résistivité : plus grande que $10^{6}\,\Omega$m. Cette résistivité décroît avec la température. Quand on applique une tension croissante à un isolant, le courant reste nul puis brusquement l'isolant « claque » quand on atteint la valeur disruptive.

2° **Un isolant ne possède pas d'électrons libres.** — Le nombre d'électrons libres par m³ est pratiquement nul quels que soient la température et le champ électrique appliqué. Pour libérer un électron il faudrait lui fournir une énergie de 7 eV environ, c'est impossible car l'isolant est détruit avant que cette valeur ne soit atteinte : un isolant ne peut devenir conducteur.

31. *Semi-conducteurs.*

1° **Existence.** — Entre les isolants et les conducteurs il existe des substances ayant une résistivité intermédiaire : 10^{-4} à 10^{6} Ωm à 0 °C, ce sont les semi-conducteurs : silicium, germanium, sélénium, oxyde de cuivre...

Au zéro absolu (— 273 °C) ce sont d'excellents isolants. **Leur coefficient de température est négatif** et relativement élevé en valeur absolue ; quand la température croît leur résistivité diminue rapidement ; à température élevée (au voisinage de leur température de fusion) ils sont devenus bons conducteurs et n'offrent plus d'intérêt.

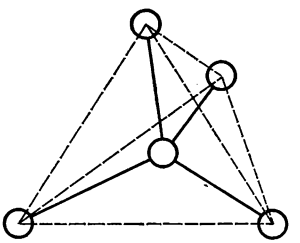


Fig. 66. — *Structure atomique des semi-conducteurs.*

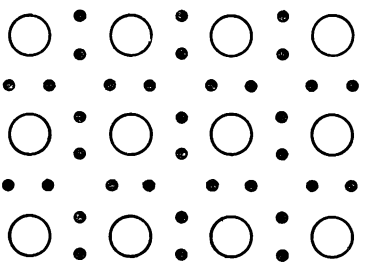


Fig. 67. *Représentation plane.*

2° **Structure atomique.** — Les semi-conducteurs (Ge, Si) sont des corps simples tétravalents dont les atomes sont fortement liés entre eux par covalence. Ils cristallisent dans le système cubique de type « diamant » : chaque atome est au centre d'un tétraèdre régulier dont les quatre sommets sont occupés par un atome voisin (fig. 66). Pour simplifier, on adopte une représentation plane plus pratique mais moins exacte (fig. 67). Chaque atome met ses 4 électrons périphériques en commun avec ses voisins ; la couche périphérique est ainsi complétée à huit électrons et le corps possède une très grande cohésion.

Dans un semi-conducteur à 0 °K la conductibilité est nulle car :

— d'une part tous les électrons sont utilisés pour les liaisons : **il n'y a pas d'électrons libres ;**

— d'autre part toutes les places disponibles dans les couches périphériques sont occupées : **un électron lié n'a pas la possibilité d'en changer.**

32. *Conductibilité intrinsèque d'un semi-conducteur.*

1° Énergie de libération d'un électron. — Pour libérer un électron lié il faut lui fournir une énergie de libération W_0. Cette énergie est de 0,7 eV pour le germanium et de 1,1 eV pour le silicium, elle est donc beaucoup plus faible que pour un isolant (7 eV) et pourra être fournie, *sans destruction du corps*, par une élévation modérée de température ou par des radiations.

Si depuis 0 °K on augmente la température du semi-conducteur, l'énergie propre des électrons augmente et certains d'entre eux, dont l'énergie dépassera W_0, pourront « s'évader » de leur atome.

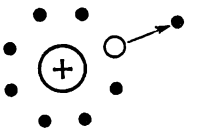


Fig. 68. — *Quand un électron s'évade, il laisse un trou dans l'architecture du cristal.*

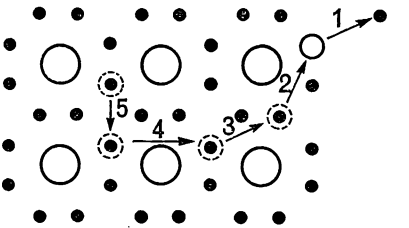


Fig. 69. — *Conduction par trous (les trous vont en sens inverse des flèches).*

Attention, l'énergie de libération ne correspond nullement à l'énergie d'extraction du métal. Dans un métal tous les électrons de conduction sont libres à toute température, il n'y a donc pas à les libérer ou si l'on veut : **l'énergie de libération est nulle pour les métaux : $W_0 = 0$.**

2° Mécanisme de la conduction. — Quand un électron s'évade il laisse derrière lui (fig. 68) :

a) *Une charge positive excédentaire sur le noyau de l'atome.*

b) *Une place disponible appelée trou ou lacune.* — Un électron lié voisin aura donc la possibilité d'occuper cette place en libérant un autre trou, lequel pourra être occupé par un nouvel électron, etc.

Une double conduction existe donc :

— **celle des électrons libres qui circulent librement en tout sens;**

— **celle des électrons liés qui vont de trou en trou.**

Pour ce deuxième type de conduction, il revient au même de dire que les électrons se déplacent dans un sens ou que les trous se déplacent en sens inverse : **c'est la conduction par trous** (fig. 69).

En l'absence de champ électrique les déplacements des électrons libres et des trous sont désordonnés. Si une tension est appliquée au cristal, le déplacement moyen se fait suivant les lignes de champ.

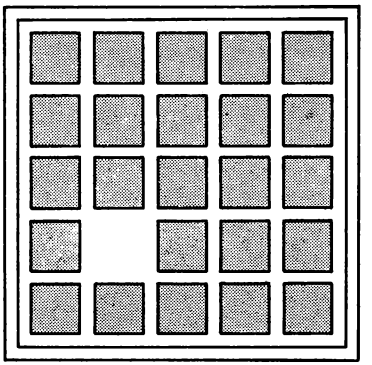


Fig. 70. — *Le pion enlevé permet le déplacement des pions restants.*

La création de trous étant **indissociable** de la libération d'électrons on dit qu'il se crée des **paires « électron-trou »**.

Si n est le nombre d'électrons libres (par m^3) et p le nombre de trous on a :

$$n = p$$

3° Comparaisons. — Pour éclairer le phénomène de double conduction nous allons en donner deux images :

a) Emplissons de pions carrés un couvercle carré aussi, aucun pion ne peut bouger. Enlevons un pion : d'une part il peut se déplacer librement hors de la boîte, d'autre part le trou qu'il occupait permet de déplacer par glissement les autres pions, le trou se déplaçant en sens inverse [1] (fig. 70).

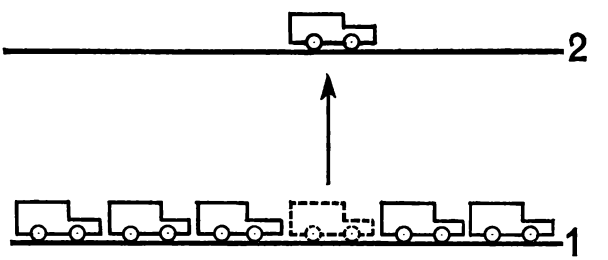


Fig. 71. — *Image due à Schockley.*

b) Si des voitures sont rangées pare-choc contre pare-choc au niveau 1 d'un garage, aucune ne peut être déplacée. Si on élève une voiture au niveau 2 (fig. 71), elle pourra se déplacer et le trou laissé libre permettra le déplacement des autres [2].

(1) On obtient un jeu de pousse-pousse.
(2) Image due à Shockley.

4° **Influence de la température.** — Le nombre d'électrons (et de trous) libres est nul à 0 °K et croît très rapidement quand la température augmente : le nombre de porteurs libres par m^3 est donné par la formule :

$$p = n = AT^{3/2}e^{-W_0/2kT}$$

— où e est la base des logarithmes népériens ($e = 2{,}718$) ;

— A est une constante dépendant du semi-conducteur ;

— T est la température absolue en °K (rappelons que 0 °C = 273° K) :

— k est une constante universelle, appelée constante de Boltzman : $k = 1{,}38 \times 10^{-23}$ J/°K ;

— W_0 est exprimée en joules.

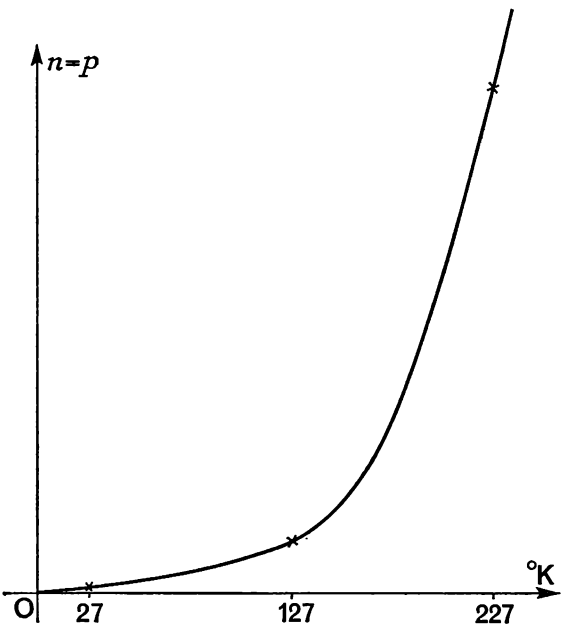


Fig. 72. — *Le nombre de porteurs croît rapidement quand la température s'élève.*

La croissance de la courbe $n = f$ (T) est vertigineuse et due beaucoup plus à l'exponentielle qu'à la puissance 3/2 (fig. 72).

Pour le germanium le nombre d'électrons libres est approximativement :

t °C . .	27	127	227	327
T °K .	300	400	500	600
$n = p$.	$2{,}5 \times 10^{19}$	$4{,}2 \times 10^{20}$	$6{,}2 \times 10^{21}$	10×10^{22}

Calculons la proportion de porteurs libres par rapport au nombre d'atomes.

La masse atomique du germanium est Ge = 73 g et sa masse volumique 5 300 kg/m³, dans un m³ il y a :

$$N = \frac{6 \times 10^{23} \times 5\,300}{73 \times 10^{-3}} = 4{,}37 \times 10^{28} \text{ atomes.}$$

Le rapport est à 27 °C : $\dfrac{\text{nombre d'atomes}}{\text{nombre de porteurs}} = \dfrac{4{,}37 \times 10^{28}}{2{,}5 \times 10^{19}} = 1{,}75 \times 10^{9}$

→ alors que dans le cuivre il y a 1 électron libre par atome, dans le germanium il y en a 1 pour 1,75 milliard d'atomes.

Par contre la mobilité y est plus grande : $\mu_n = 0{,}36$ pour les électrons et $\mu_p = 0{,}17$ pour les trous (dans le cuivre $\mu_n = 0{,}00474$).

5° **Conductivité.** — Calculons celle du germanium à 27 °C ($n = p$) :

$$\gamma = e(n\mu_n + p\mu_p) = 1{,}6 \times 10^{-19} \times 2{,}5 \times 10^{19}\,(0{,}36 + 0{,}17) \simeq 2{,}1\ \Omega^{-1}m^{-1}$$

$$\text{soit } \rho = \frac{1}{\gamma} = 0{,}47\ \Omega\text{m}$$

c) Pour le silicium on a :

$n = 2 \times 10^{16}$; $\mu_n = 0{,}12$; $\mu_p = 0{,}025$ et $\rho = 2\,160\ \Omega$m.

La résistivité intrinsèque du silicium est donc nettement plus grande que celle du germanium.

33. *Thermistances.*

1° **Constitution.** — Ce sont des résistances obtenues par frittage d'oxydes métalliques : fer, nickel, manganèse, tungstène... Ces oxydes en poudre sont comprimés puis chauffés à une température inférieure à

celle de fusion. Les thermistances ont des formes variées : perle, pastille, cylindre.

2° **Propriétés.** — Les oxydes sont des semi-conducteurs. Quand la température augmente, le nombre de porteurs croît rapidement ainsi que la conductivité ; la résistivité au contraire diminue. Les thermistances

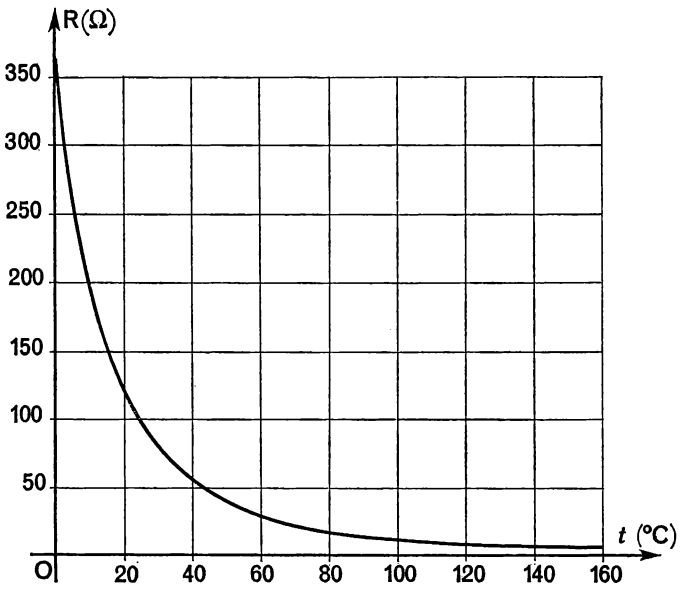


Fig. 73.

ont donc un coefficient de température négatif, c'est pourquoi on les désigne aussi sous le nom de **C.T.N. : Coefficient de Température Négatif.** Ce coefficient est de l'ordre de 10 fois celui du cuivre : $a \simeq -0{,}04$, au voisinage de 25 °C.

3° **Variations de la résistance.** — La résistance d'une C.T.N. est définie à 25 °C; pour une résistance de 100 Ω, nous avons relevé :

T (°C) . .	0	20	25	40	60	80	100	120	140	160
R (Ω) . .	360	120	100	55	28	17	11	6,5	4,2	3,3

à titre de comparaison une résistance en cuivre de 360 Ω à 0 °C aurait à 160 °C une valeur R = 590 Ω.

La courbe R = f (t) est donnée fig. 73.

34. *Résistances non linéaires.*

1° **Constitution.** — Les résistances non linéaires, en abrégé RNL ou VDR (voltage dépendant résistor) sont fabriquées avec du carbure de silicium réduit en poudre, aggloméré par un liant électriquement très résistant, comprimé et cuit au four. On les trouve dans le commerce sous forme de pastilles ou de disques (fig. 74).

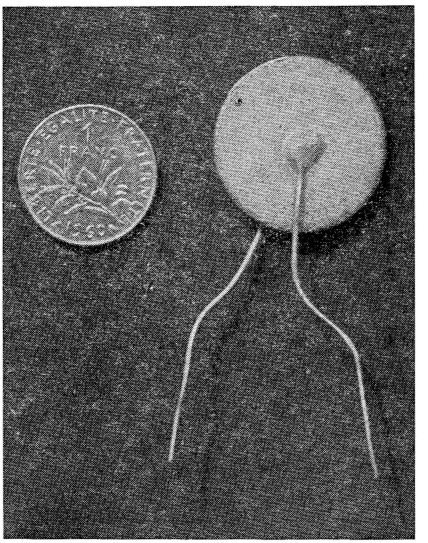


Photo de l'auteur.

Fig. 74. — *Résistance non linéaire en pastille.*

2° **Propriété. — A température constante la résistance d'une RNL décroît avec la tension appliquée.**

Noter que les RNL ont un coefficient de température négatif et que pour mettre en évidence la propriété il faut absolument les expérimenter à température invariable.

Soient R = 100 Ω sous une tension de 10 V la valeur commune à une résistance métallique (linéaire) et à une RNL, le courant est $I = \frac{U}{R} = 0{,}1$ A. Si l'on double la tension :

a) Pour la résistance métallique R = Cte, $I' = \frac{20}{100} = 0{,}2$ A.

b) Pour la RNL, R est devenue < 100 et le courant a plus que doublé $\frac{20}{<100} = I'' > 0{,}2$ A. Le courant et la tension ne sont plus proportionnels.

3° **Caractéristique.** — C'est la courbe U = f (I), relevée à température constante (fig. 75).

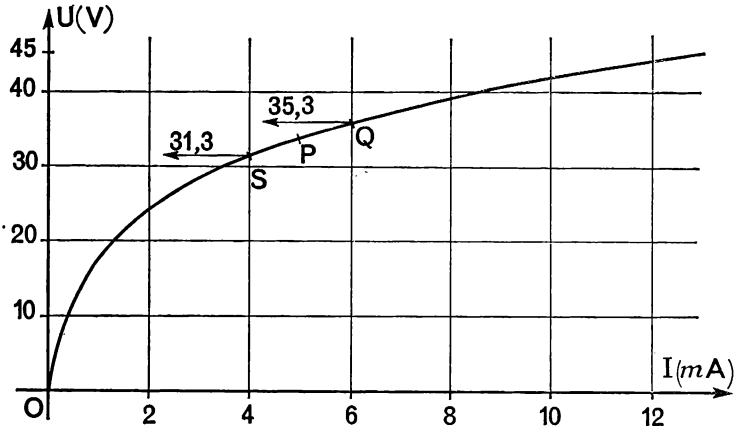


Fig. 75. — *Caractéristiques d'une RNL.*

U (V) . . .	0	12	18	25	30	35	40	45
I (mA). . .	0	0,5	1	2,3	3,5	5,7	8,8	12,9

4° **Résistance dynamique.** — *a*) On peut définir une résistance statique; pente [1] de la droite OP.

b) Pour l'utilisation au voisinage d'une tension donnée c'est la résistance dynamique locale qui est importante : **la résistance dynamique est le quotient d'une petite variation de tension par la variation de courant qu'elle produit :**

$$R_d = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

Elle se détermine à l'aide de relevés effectués sur la courbe $U = f(I)$.

EXEMPLE. — Au voisinage de P (33 V, 5 mA) on trouve entre S et Q ;

$$\Delta U_d = 4 \text{ V}, \quad \Delta I_d = 2 \text{ mA} \quad R_d = \frac{4}{2} = 2 \text{ k}\Omega$$

(1) Voir page 102.

5° En alternatif, si la tension est sinusoïdale, le courant ne l'est plus (fig. 76). La résistance R permet d'observer la courbe $i = f(t)$ sur l'oscillographe.

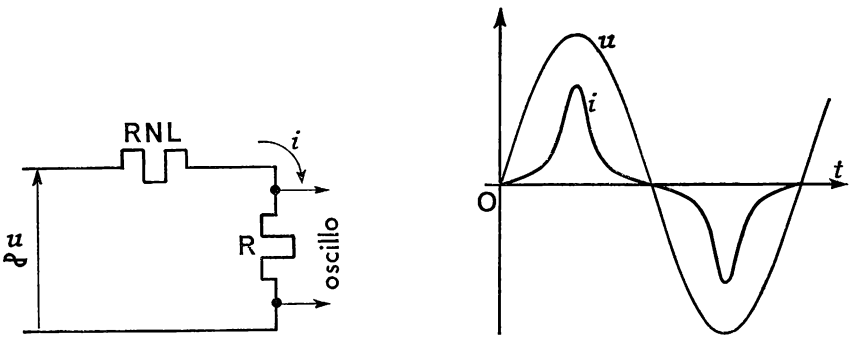


Fig. 76. — *Courbe du courant en alternatif.*

6° **Utilisations.** — a) *Citons.* — Régulation de tension, écrêtage de tension, parafoudres...

b) *Étude de la régulation de tension en continu.* — Une résistance linéaire est en série avec la RNL (fig. 77). Quand U_1 augmente le courant augmente davantage ainsi que la chute de tension $U = RI$ et la tension U_2 varie proportionnellement moins que U_1. Voici quelques valeurs relevées avec la RNL de la courbe 75 et une résistance métallique $R = 6\,000\ \Omega$.

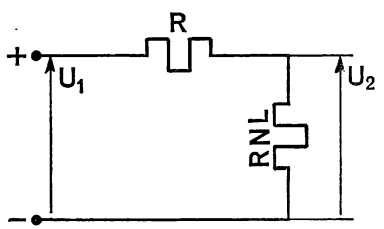


Fig. 77. — *Stabilisation de tension par RNL.*

U_1 .	60	69	80	92	105,5	124	142,8
U_2 .	32,5	35	37,5	40	42,5	45	48

entre les points 6 et 7

U_1 varie de 18,8 V soit $\frac{18,8}{124} = 0,15 \rightarrow 15\ \%$

U_2 varie de 3 V soit $\frac{3}{45} = 0,066 \rightarrow 6,66\ \%$

EXERCICES

5. 01. — Calculer le nombre d'électrons libres par m^3 d'aluminium (3 électrons libres par atome). On donne A = 27 g, masse spécifique 2 700 kg/m^3 [18×10^{28}].

5. 02. — Calculer la vitesse des électrons dans l'aluminium pour $\Delta = 5$ A/mm^2 [0,174 mm/s].

5. 03. — Calculer la mobilité des électrons de l'aluminium sachant que $\rho = 2{,}7 \times 10^{-8}$ Ωm [0,0013].

5. 04. — Un semi-conducteur contient 10^{20} paires électron-trou par m^3, calculer sa résistivité sachant que $\mu_n = 0{,}2$ et $\mu_p = 0{,}05$ [0,25 Ωm].

5. 05. — Calculer la vitesse des porteurs du semi-conducteur précédent quand on le place dans un champ de 0,5 V/m [0,1 et 0,025 m/s].

5. 06. — A 327 °C le germanium contient 10^{23} paires électron-trou de libres par m^3. Calculer sa résistivité à cette température. On rappelle $\mu_n = 0{,}36$ et $\mu_p = 0{,}17$ [$\simeq 0{,}118 \times 10^{-3}$ Ωm].

5. 07. — Quelle densité de courant devrait-on avoir dans le cuivre pour que la vitesse des électrons soit 1 m/s? [13 200 A/mm^2].

5. 08. — Pour obtenir la même densité de courant $\Delta = 5$ A/mm^2 dans le cuivre ($\rho = 1{,}6 \times 10^{-8}$) et dans le germanium ($\rho = 0{,}5$) quels champs électriques doit-on appliquer? [0,08 V/m et 2,5 MV/m].

5. 09. — La résistance d'une CTN est 500 Ω à 0 °C et 400 Ω à 4 °C. Calculer son coefficient de température moyen en appliquant la formule $R = R_0(1 + at)$ [$a = -0{,}05$].

5. 10. — Tracer en fonction de U, la courbe donnant la résistance dynamique d'une RNL pour laquelle on a relevé :

U (V) .	50	80	100	150	200	250	300
I (A). .	0,03	0,11	0,2	0,65	1,5	3	5

PROBLÈMES

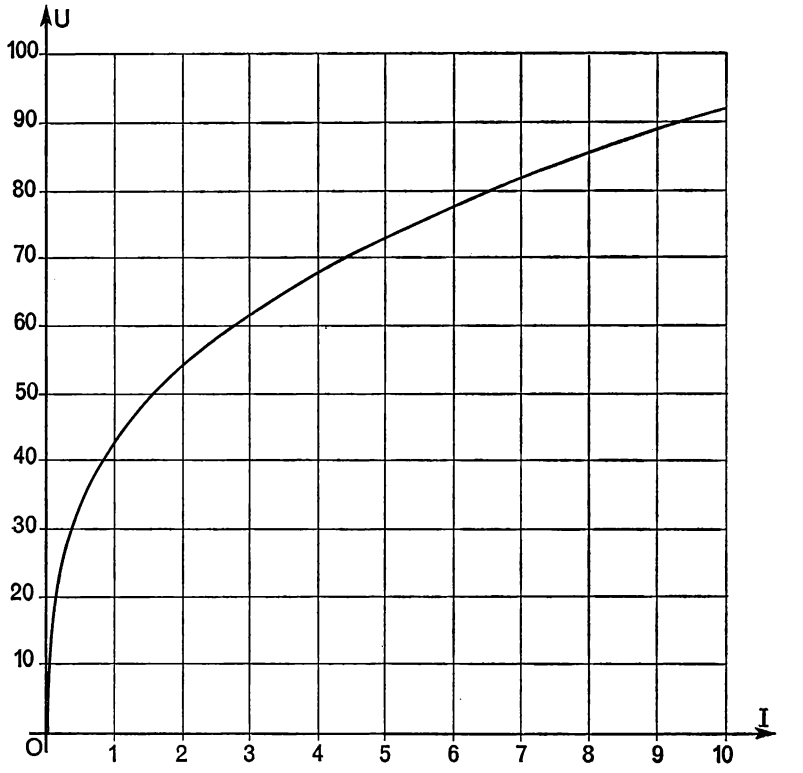
I. AVEC SOLUTION.

5. 11. — La caractéristique d'une RNL peut s'écrire $I = cU^n$. Deux mesures effectuées sur une RNL ont donné :
pour $U_1 = 20$ V $\rightarrow I_1 = 0{,}1$ A et pour $U_2 = 40$ V $\rightarrow I_2 = 0{,}8$ A.
1° Déterminer c et n.

2° Calculer R pour des tensions allant de 10 à 100 V et échelonnées par 10 V.

3° Tracer la courbe $U = f(I)$ et déterminer graphiquement R_d pour les tensions du 2°.

4° Exprimer la résistance dynamique $R_d = \frac{dU}{dI}$ en fonction de U et comparer les valeurs de R_d que l'on calculera à celles de la détermination graphique.



— Solution —

1° Avec les données on obtient deux relations : $0{,}1 = c \times 20^n$ et $0{,}8 = c \times 40^n$.

Le rapport donne : $8 = \frac{40^n}{20^n} = 2^n \Rightarrow n = 3$.

Calcul de c : $c = \frac{0{,}1}{20^3} = \frac{1}{80\,000} \Rightarrow I = \frac{U^3}{80\,000}$

2° On calcule I voir tableau.

3° Courbe figure ci-contre. Relevés en tableau.

4° $dI = \frac{3U^2 dU}{80\,000} \Rightarrow R_d = \frac{dU}{dI} = \frac{80\,000}{3U^2}$

TABLEAU DES RÉSULTATS

U (V)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
I (A)	0,0125	0,1	0,338	0,8	1,56	2,7	4,3	6,4	9,1	12,5
R graphique . .	?	?	30	17	10	8	5	4	3,3	2,7
R calculée . . .	267	66,7	29,6	16,7	10,7	7,4	5,44	4,17	3,3	2,67

REMARQUE. — Pour 10 et 20 V la détermination graphique est impossible.

II. A RÉSOUDRE.

5. 12. — Tracer la courbe $R = f(t)$ de la CTN suivante :

t (°C) ..	0	20	40	60	80	100	120
R (Ω) .	500	180	65	30	16	8,5	5

Déterminer le coefficient a de la formule $R = R_0 (1 + at)$ pour que cette dernière représente approximativement la résistance de la CTN entre 0 et 20 °C. Calculer avec cette formule la résistance à 40 °C et conclure.

5. 13. — On donne la caractéristique d'une RNL.

U (V)..	100	200	300	350	400	450	500	550	600
I (mA) .	0,2	1,5	5	8	12,5	17,5	23,5	31	40

1° Tracer la courbe et déterminer graphiquement la résistance dynamique en chaque point donné.

2° Calculer la puissance dissipée pour chaque valeur de la tension et tracer la courbe $P = f(U)$.

5. 14. — Le silicium a une masse atomique Si = 28 g et une masse volumique $m = 2\,330$ kg/m³. A la température considérée il contient 10^{18} électrons libres (et trous) par m³.

1° Calculer le nombre d'atomes contenus dans 1 m³.

2° Combien y a-t-il d'atomes pour un électron libre?

3° Quelles sont la conductivité et la résistivité du silicium pour les mobilités suivantes $\mu_n = 0{,}12$ et $\mu_p = 0{,}025$?

4° Un fil de silicium de 0,5 m de longueur et de 1 mm² de section est soumis à une tension de 0,3 V; calculer :

a) la résistance du fil;

b) la vitesse des deux types de porteurs.

6

SEMI-CONDUCTEUR DOPÉ

35. *Dopage d'un semi-conducteur.*

1° **Définition.** — Le dopage est l'introduction dans le semi-conducteur d'un corps étranger appelé **dopeur.**

2° **Dopeurs.** — Les semi-conducteurs utilisés, le germanium (Ge) et le silicium (Si) appartiennent à la colonne IV B de la classification de Mendéléieff, ils ont quatre électrons périphériques (revoir fig. 8). Les dopeurs sont les éléments voisins des colonnes III B : bore (B), aluminium (Al), gallium (Ga), indium (In) et V B : azote (N), phosphore (P), arsenic (As), antimoine (Sb) (fig. 78).

III B	IVB	VB
B		N
Al	Si	P
Ga	Ge	As
In		Sb

Fig. 78. — *Semi-conducteurs et dopeurs.*

3° **Doses.** — Les dopeurs sont introduits en quantité très faible : de l'ordre de 1 atome pour 1 million soit 10^{-6} en valeur relative; en gros il y a 1 g de dopeur pour 1 tonne de semi-conducteur. L'atome dopeur s'intègre dans le cristal du semi-conducteur et se trouve toujours entouré par des atomes de celui-ci. Avant le dopage le semi-conducteur doit être purifié au maximum.

4° **Conductibilité extrinsèque.** — Après dopage, la conductibilité est essentiellement due au dopeur, elle est **extrinsèque** (1). Le semi-conducteur est également appelé extrinsèque.

36. *Semi-conducteur extrinsèque, type « N ».*

1° **Constitution.** — Le dopeur appartient à la colonne V B (N, P, As, Sb), il possède 5 électrons périphériques alors que le germanium et le silicium n'en ont que quatre. Quand un atome de dopeur prend dans

(1) **Extrinsèque = qui vient du dehors.**

le cristal la place d'un atome de semi-conducteur, quatre électrons seulement sont utilisés pour les liaisons interatomiques ; le cinquième est en excès, **il n'y a pas de place pour lui** (fig. 79).

Notons bien que **l'électron est en excès au point de vue place mais pas en tant que charge** : le cristal reste neutre comme les atomes qui le constituent.

2° **Libération de l'électron excédentaire.** — L'énergie de libération est très faible : de l'ordre de 0,01 *e*V pour le germanium et 0,05 eV

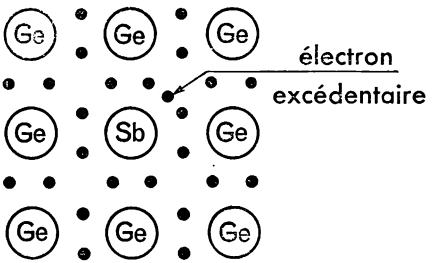


Fig. 79. — *L'électron excédentaire n'est pas utilisé dans les liaisons.*

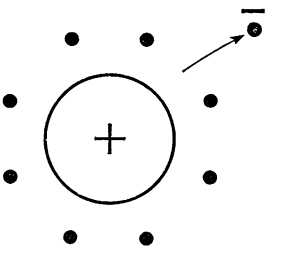


Fig. 80. — *Le départ de l'électron excédentaire laisse une charge positive sur le noyau mais pas de trou.*

pour le silicium. Bien avant la température ordinaire (20 °C) tous les électrons excédentaires du dopeur se trouvent libérés et peuvent participer à la conduction. Parce qu'il apporte des porteurs de type N (négatif) le dopeur est appelé **donneur** (sous-entendu d'électrons), retenons :

doNneur = N

3° **Porteurs.** — En quittant leur atome, les électrons excédentaires y laissent une charge positive liée (ion positif) (fig. 80) mais pas de place libre, **pas de trou.** La conductibilité extrinsèque apporte donc beaucoup d'électrons et aucun trou.

Les seuls trous présents devraient être ceux qui existaient dans le semi-conducteur intrinsèque avant le dopage mais, étant donné la surabondance d'électrons par rapport aux trous, la plupart de ceux-ci se trouvent comblés par un électron, on dit qu'**ils ont piégé un électron.** Finalement dans un semi-conducteur N il y a : beaucoup d'électrons originaires du donneur, peu d'électrons et encore moins de trous provenant de la conductibilité intrinsèque.

Les électrons sont les porteurs **majoritaires** et les trous les porteurs **minoritaires** : $n \gg p$.

4° **Conductivité.** — Rappelons que dans 1 m³ de germanium pur il y a $4{,}37 \times 10^{28}$ atomes et $2{,}5 \times 10^{19}$ porteurs n et p (§ 32). Si l'on introduit de l'antimoine à raison de 1 atome pour 1 million d'atomes de germanium, il y aura au m³ $\frac{4{,}37 \times 10^{28}}{10^6} = 4{,}37 \times 10^{22}$ atomes d'antimoine qui donneront autant d'électrons libres ; les $2{,}5 \times 10^{19}$ porteurs du Ge pur sont négligeables devant les $4{,}37 \times 10^{22}$ porteurs du donneur [1] :

LA CONDUCTIVITÉ INTRINSÈQUE EST NÉGLIGEABLE DEVANT LA CONDUCTIVITÉ EXTRINSÈQUE

Calculons la conductivité obtenue avec ces données en supposant la mobilité inchangée $\mu_n = 0{,}36$ (p est négligeable) :

$$\gamma = en\mu_n = 1{,}6 \times 10^{-19} \times 4{,}37 \times 10^{22} \times 0{,}36 = 2{,}5 \times 10^3 \Omega^{-1} m^{-1},$$

soit plus de mille fois celle du Ge pur qui était 2,1 $\Omega^{-1}m^{-1}$.

37. *Semi-conducteur extrinsèque, type « P ».*

1° **Constitution.** — Le dopeur appartient à la colonne III B (B, Al, Ga, In), il possède 3 électrons périphériques alors que le germanium et le silicium en ont quatre. Quand un atome du dopeur prend dans le cristal la place d'un atome de semi-conducteur, un électron manque pour assurer les liaisons interatomiques, il y a donc un **trou en excès** (fig. 81). Notons bien qu'il y a un trou inoccupé mais sans charge : le cristal reste neutre comme les atomes qui le constituent.

2° **Occupation du trou.** — Il suffit d'une énergie très faible, de l'ordre de 0,01 eV (ou 0,05 eV) pour qu'un électron lié voisin vienne occuper le trou et par suite en libère un autre. Bien avant la température ordinaire (20 °C), cette énergie se trouve fournie aux électrons liés et un véritable « caroussel » en résulte : **les électrons liés sautent de trou en trou.**

(1) Aux températures d'utilisation.

Alors que les trous apportés par l'accepteur étaient neutres, la libération d'un trou par un électron lié s'accompagne de l'apparition d'une charge positive sur le noyau correspondant, donc de la formation d'un « trou positif » ; de plus, un électron ayant comblé son trou, l'atome d'accepteur est devenu un ion négatif (fig. 82). Le déplacement dans un sens d'électrons négatifs est équivalent au déplacement dans le sens opposé :

a) de trous ;

b) de charges positives.

La conduction se fait par trous positifs.

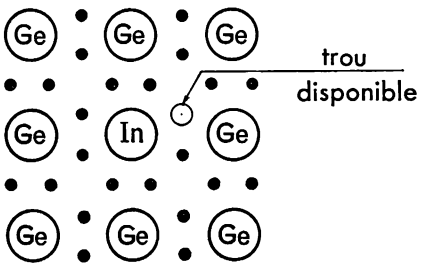


Fig. 81.
Un trou n'est pas occupé.

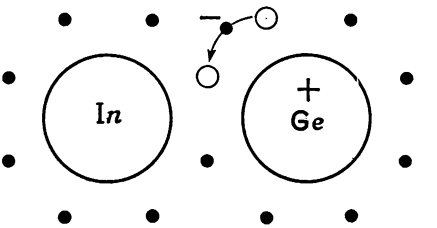


Fig. 82. — *Le nouveau trou est positif tandis que l'accepteur devient ion négatif.*

Parce qu'il provoque une conduction de type P (positif) le dopeur est appelé **accepteur** (sous-entendu d'électrons), retenons :

accePteur = P

3° **Porteurs.** — L'accepteur apporte beaucoup de trous mais pas un seul électron libre. Les seuls électrons libres présents devraient être ceux qui existaient dans le semi-conducteur intrinsèque avant le dopage mais, étant donné la surabondance de trous par rapport aux électrons libres, la plupart de ceux-ci sont **piégés par un trou.**

Finalement, dans un semi-conducteur P il y a : beaucoup de trous originaires de l'accepteur, peu de trous et encore moins d'électrons libres provenant de la conductibilité intrinsèque.

Les trous sont les porteurs **majoritaires** et les électrons les porteurs **minoritaires** : $p \gg n$.

4° **Conductivité.** — Si l'on introduit de l'indium dans du germanium à raison de 1 atome de In pour 1 million d'atomes de Ge on aura dans 1 m^3 : $4{,}37 \times 10^{28}$ atomes de Ge, $2{,}5 \times 10^{19}$ porteurs n et p (intrin-

sèques) et $4{,}37 \times 10^{22}$ atomes d'indium donnant $4{,}37 \times 10^{22}$ porteurs p ; on pourra donc négliger la conductivité due aux $2{,}5 \times 10^{19}$ porteurs du germanium pur.

→ Ici encore, **la conductivité intrinsèque est négligeable devant la conductivité extrinsèque.**

En supposant inchangée la mobilité $\mu_p = 0{,}17$, la conductivité obtenue sera :

$$\gamma = ep\mu_p = 1{,}6 \times 10^{-19} \times 4{,}37 \times 10^{22} \times 0{,}17 \simeq 1{,}2 \times 10^{3} \Omega^{-1}\mathrm{m}^{-1}$$

soit près de mille fois celle du Ge pur.

5° Tableau comparatif.

Conducteurs	n	p	μ_n	μ_p	γ (2)	ρ (Ωm)
Cuivre . . .	$8{,}25 \times 10^{28}$	0	$4{,}7 \times 10^{-3}$		$6{,}25 \times 10^{7}$	$1{,}6 \times 10^{-8}$
Germanium pur . . .	$2{,}5 \times 10^{19}$	$2{,}5 \times 10^{19}$	0,36	0,17	2,1	0,47
Ge N (1) . . .	$4{,}37 \times 10^{22}$	0	0,36		$2{,}5 \times 10^{3}$	4×10^{-4}
Ge P (1) . .	0	$4{,}37 \times 10^{22}$		0,17	$1{,}2 \times 10^{3}$	$8{,}3 \times 10^{-4}$

(1) Un atome de dopeur pour 1 million.
(2) $\gamma = \gamma_n + \gamma_p$.

38. *Influence de la température.*

1° Au zéro absolu, aucun porteur n'étant libéré les conductibilités intrinsèque et extrinsèque sont nulles. Quand la température croît la conductibilité extrinsèque (0,01 eV ou 0,05 eV) apparaît ; **elle est totale bien avant 0 °C et reste sensiblement constante ensuite,** la conductibilité intrinsèque restant négligeable. A 100 °C pour le germanium et 200 °C pour le silicium la conductibilité intrinsèque (0,7 eV et 1,1 eV) commence à croître rapidement et le semi-conducteur devenu conducteur perd son originalité et devient sans intérêt (1) (fig. 83).

(1) La conductibilité intrinsèque est même nuisible dans les applications.

2° C'est à cause de cette limite de 200 °C, qui permet de l'utiliser avec plus de sécurité, que le silicium est préféré au germanium. Remarquons aussi que le germanium est relativement rare dans l'écorce terrestre alors que le silicium est l'élément le plus répandu [1]; enfin le courant inverse des diodes est plus faible avec le silicium (ch. 7).

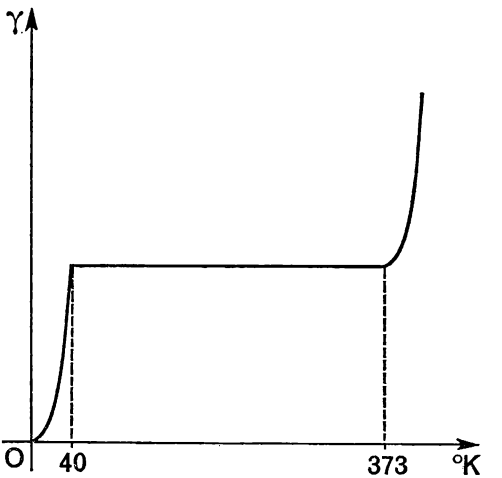


Fig. 83. — *La conductibilité extrinsèque est totale à 40 °K; la conductibilité intrinsèque apparaît à 373 °K (germanium).*

(1) Silice (sable) et silicates.

EXERCICES

6. 01. — Calculer le nombre d'atomes contenus dans 1 m^3 de silicium masse atomique 28 g, masse volumique 2 330 kg/m^3 [5×10^{28}].

6. 02. — Calculer la résistivité intrinsèque du silicium sachant que $\mu_n = 0{,}12$, $\mu_p = 0{,}025$ et que le nombre de paires électron-trou au m^3 est 2×10^{16} [2160 Ωm].

6. 03. — On dope du silicium à raison de 1 atome de donneur pour 10^6 atomes de Si. Calculer la résistivité extrinsèque (mobilité inchangée) [$\simeq 10^{-3}$ Ωm].

6. 04. — On dope du silicium à raison de 1 atome d'accepteur pour 10^6 atomes de Si. Calculer la résistivité extrinsèque (mobilité inchangée) [5×10^{-3} Ωm].

PROBLÈMES

6. 05. — On dope du germanium à raison de 1 atome de dopeur P pour 5 millions d'atomes de Ge. En supposant que les mobilités $\mu_n = 0{,}36$ et $\mu_p = 0{,}17$ sont constantes et qu'aucun électron n'est piégé, calculer la conductivité totale aux températures de 27 °C et de 127 °C sachant qu'à ces températures les nombres de paires électron-trou du germanium pur sont respectivement $2{,}5 \times 10^{19}$ et $4{,}2 \times 10^{20}$ (Il y a $4{,}37 \times 10^{28}$ atomes par m^3 de Ge).

7

JONCTION P-N
DIODE A JONCTION

39. *La jonction P-N.*

1° **Définition.** — Une jonction P-N est une région de faible épaisseur (1 μm) d'un monocristal, dans laquelle le semi-conducteur passe progressivement du type P au type N.

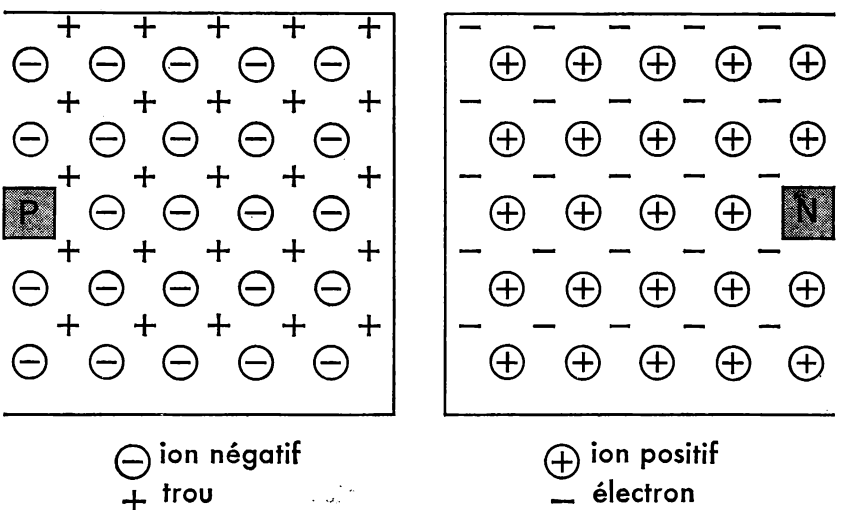


Fig. 84.

2° **Modification de structure au voisinage de la jonction.** — Avant la jonction (fig. 84), outre les atomes complets de semi-conducteur intrinsèque (*Ge* ou *Si*) :

— le semi conducteur P possède en quantités égales des trous positifs mobiles et des charges négatives liées (ions négatifs de l'accepteur)[1], P est donc électriquement neutre.

(1) Il existe aussi quelques minoritaires, électrons pour P, trous pour N.

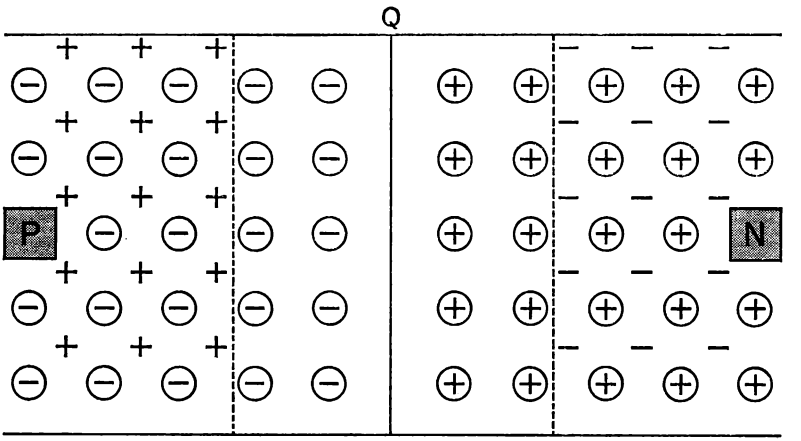


Fig. 85. — *La jonction PN.*

— le semi-conducteur N possède en quantités égales des électrons négatifs mobiles et des charges positives liées (ions positifs du donneur)[1], N est donc électriquement neutre.

Quand la jonction est réalisée [2] (fig. 85) :

— des électrons libres de N diffusent vers P et se recombinent avec des trous de celui-ci, ils laissent derrière eux les ions positifs du donneur.

— des trous de P diffusent vers N et se recombinent avec des électrons de celui-ci, ils laissent derrière eux les ions négatifs de l'accepteur.

Finalement, sur une faible épaisseur, à gauche de la jonction il y a un excédent de charges négatives sur P et à droite il y a un excédent de charges positives sur N ; les régions situées au delà des pointillés restant neutres.

La nouvelle distribution des charges crée à cheval sur Q une barrière de potentiel V de quelques dixièmes de volts (fig. 86) qui, répartie sur un micron d'épaisseur, produit un champ électrique intense $\vec{E}$ dirigé de N vers P.

3° **Rôle du champ.** — Le champ tend à renvoyer les porteurs qui tentent de traverser Q vers leur région d'origine. Il limite donc la diffusion de ces porteurs, celle-ci se produit jusqu'à ce que le champ soit

(1) Il existe aussi quelques minoritaires, électrons pour P, trous pour N.
(2) Nous conseillons de lire immédiatement le § « Fabrication ».

assez intense pour s'y opposer : la diffusion des porteurs majoritaires des arrière-régions de N (électrons) et de P (trous) est stoppée par le champ (fig. 87).

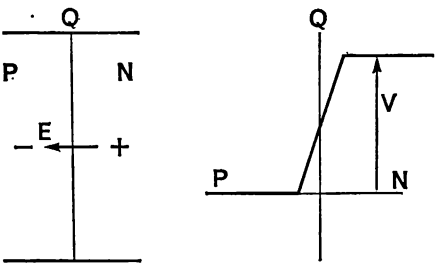


Fig. 86. — *Champ électrique et barrière de potentiel.*

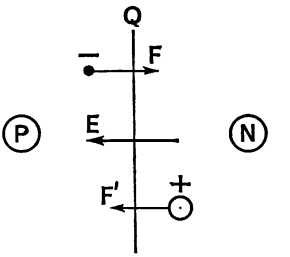


Fig. 87. — *Le champ électrique tend à renvoyer les porteurs vers leur région d'origine.*

40. *La jonction P-N ne conduit que dans un seul sens.*

1° **Expériences.** — Appliquons une tension de 0,8 V à une jonction PN.

a) Le pôle + étant relié à la région N, le courant est presque nul : quelques microampères (fig. 88).

b) Le pôle + étant relié à la région P, le courant passe (fig. 89), il est de l'ordre de l'ampère.

La jonction PN fonctionne comme une diode à vide : elle conduit de P vers N et ne conduit pas de N vers P **(sens conventionnel du courant)**, retenons :

sens N → P = sens Non Passant

On peut aussi retenir que le courant passe quand le pôle Positif est en P et le Négatif en N.

Par analogie avec la diode le côté P est appelé anode et le côté N cathode. Le courant va à l'intérieur de l'anode vers la cathode.

Alimentée en alternatif, la jonction PN sera traversée par un courant unidirectionnel. Elle aura en électricité un rôle analogue à celui d'une valve ou d'une soupape en mécanique.

2° **Interprétation.** — a) *Quand N est positif.* — La tension U appliquée par la source s'ajoute arithmétiquement à V et la diffusion des porteurs majoritaires p (trous) de P vers N déjà stoppée par la barrière de potentiel l'est encore davantage (fig. 88). Il en est de même de la diffusion des porteurs majoritaires n de N vers P.

Par contre la diffusion des rares porteurs minoritaires n de P (électrons libres) et p de N (trous) est favorisée et explique le faible courant

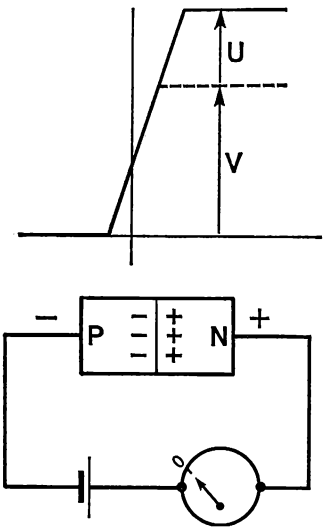


Fig. 88. — *La tension renforce la barrière de potentiel : pas de courant.*

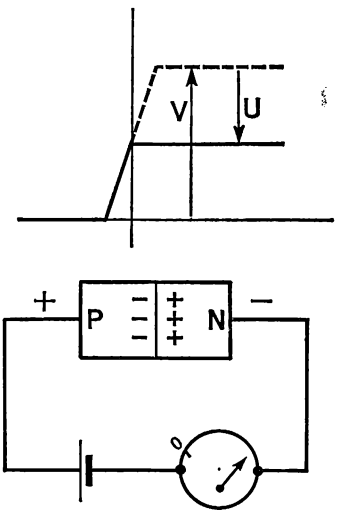


Fig. 89. — *La barrière de potentiel étant abaissée, la diffusion reprend.*

mesuré. Si le courant est faible c'est uniquement **à cause de la rareté des porteurs minoritaires.**

b) *Quand P est positif.* — La tension U appliquée par la source se retranche de V (fig. 89) et la barrière de potentiel étant abaissée la diffusion des trous de P vers N (et des électrons de N vers P) peut reprendre. Dès qu'ils ont franchi la jonction dans le sens P-N les trous sollicités par le pôle ⊖ de la source sont évacués et la diffusion peut continuer indéfiniment.

3° **Influence de la température de la jonction.** — Nous savons que la conductibilité intrinsèque apparaît quand le germanium atteint 100 °C et le silicium 200 °C. Des paires électrons-trous se trouvent alors créées en grand nombre dans les deux parties N et P de part et d'autre

de la jonction et le nombre de porteurs majoritaires et minoritaires y croît rapidement. Le courant inverse — dû aux minoritaires — va également augmenter et la jonction perdra son pouvoir de redressement.

En outre, le courant inverse étant produit sous tension élevée, la puissance dissipée sur la jonction entraînera sa destruction.

Pour le silicium, la température maximale admise sur une jonction est de l'ordre de 150 °C.

4° **Autres redresseurs à jonction.** — Alors que l'utilisation du germanium et du silicium est récente, on utilisait depuis longtemps des redresseurs à jonction entre un métal et un semi-conducteur. Les deux types principaux étaient :

a) Sélénium $\xrightarrow{\text{sens passant}}$ alliage (Sn, Bi, Cd) ;

b) Oxyde de cuivre $\xrightarrow{\text{sens passant}}$ cuivre.

Ces redresseurs ne sont pratiquement plus fabriqués sauf pour leur utilisation dans les appareils de mesure où leur faible seuil de tension les font préférer aux autres.

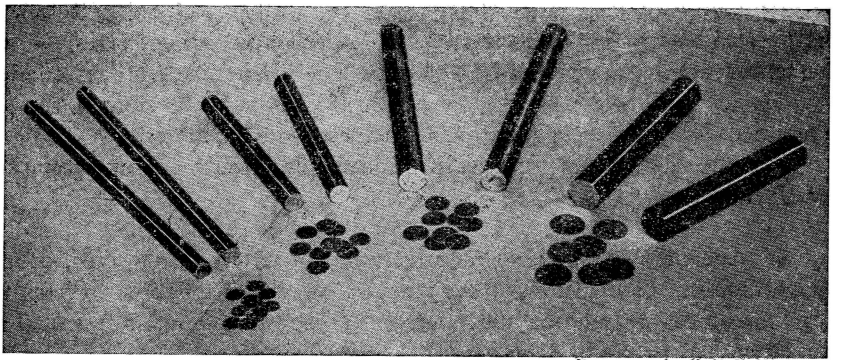
5° **Redresseurs à pointe.** — Ils remplacent les diodes à vide pour les faibles courants. Citons pour mémoire le détecteur des postes à galène qui était une diode à pointe.

41. *Fabrication d'une jonction P-N.*

1° **Purification du semi-conducteur.** — La présence d'impuretés naturelles modifie considérablement la résistivité du semi-conducteur car ces impuretés se conduisent comme des dopeurs. Il est donc nécessaire de purifier au maximum.

Le silicium commercial à 10^{-4} (0,01 % d'impuretés) est purifié par voie chimique puis physique pour donner du silicium à 10^{-10} c'est-à-dire ne contenant plus qu'un seul atome d'impuretés pour 10 milliards d'atomes de Si, soit 1 milligramme pour 10 tonnes!!!

2° **Dopage et tirage du monocristal.** — Le dopeur N (par exemple), également très pur, est ajouté au silicium et conduit au « Si N ». On plonge ensuite dans le semi-conducteur dopé en fusion un petit cristal de même nature que l'on sort lentement du bain, le cristal augmente



Documents C.D.S.W.

Fig. 90. — *Lingots et pastilles de silicium.*

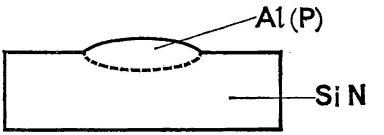
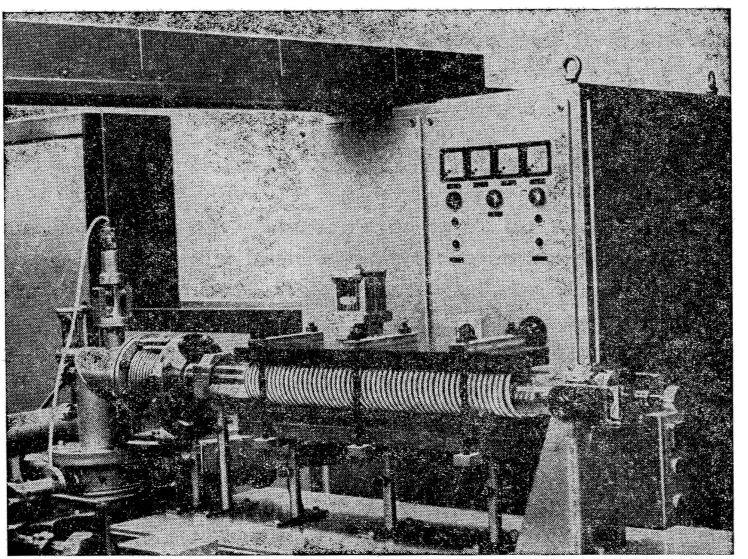


Fig. 91. — *Réalisation par alliage d'une jonction.*



Documents C.D.S.W.

Fig. 91 *bis.* — *Four haute fréquence.*

de volume donnant ainsi naissance à un monocristal, c'est-à-dire un solide ayant la même structure d'un bout à l'autre ou, si l'on veut, dont les atomes sont régulièrement distribués.

3° **Fabrication des « pastilles ».** — Le lingot est scié au diamant en pastilles (fig. 90), l'extérieur est éliminé par découpage aux ultrasons ; chaque pastille est polie, d'abord avec un abrasif (alumine), puis par attaque chimique limitée (mélange d'acides nitrique, acétique et fluorhydrique), on obtient ainsi une pastille de 200 μm d'épaisseur environ.

4° **Dopage.** — Le dopeur N ayant été ajouté au lingot, les pastilles obtenues sont du même type. Pour obtenir une jonction PN il reste à modifier en surface le Si N. On peut l'obtenir ;

— *par tirage :* en ajoutant un dopeur P au bain ;

— *par alliage :* on dépose une parcelle d'impureté P sur la pastille et on chauffe dans un four haute fréquence (fig. 91 et 91 *bis*).

— *par diffusion :* le Si N et le dopeur P sont placés côte à côte dans un tube en quartz et chauffés, les vapeurs de P modifient le Si N en surface.

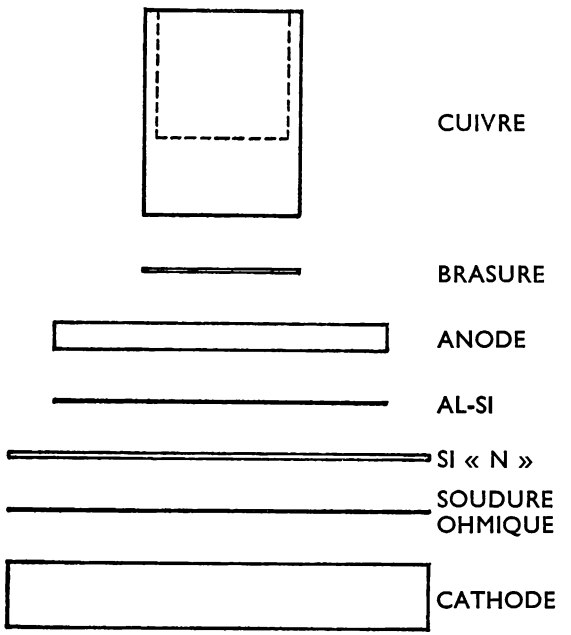
5° **Remarque Importante.** — Ainsi la jonction PN n'est pas une simple juxtaposition [1] par contact de deux semi-conducteurs N et P, c'est au contraire une modification de la structure interne, le cristal passant sans discontinuité de matière du type N au type P.

42. *Caractéristique directe d'une diode à jonction.*

1° **Constitution.** — L'élément de base est une jonction PN. Les différentes parties de la cellule définitive (fig. 92) sont soudées à 900 °C. Il reste à effectuer l'habillage : connexions, emboîtage, gaine de protection (fig. 93).

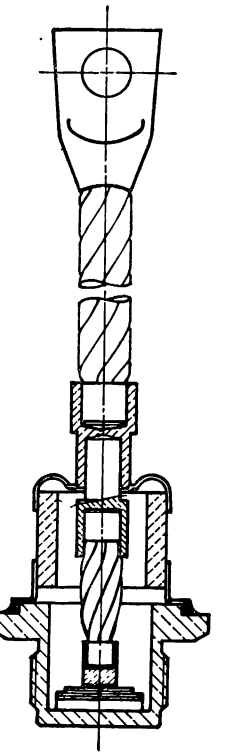
La diode est souvent appelée redresseur sec. Nous la représenterons dans les schémas par le symbole général des redresseurs (fig. 94). Aujourd'hui le silicium est à peu près seul utilisé. Il existe toute une gamme de redresseurs pouvant fournir un courant redressé allant de 1 A à plus

(1) Tout comme une soudure ne doit pas être un simple « collage ».



Document C.D.S.W.

Fig. 92.
Éléments constituant la cellule.



Document C.D.S.W.

Fig. 93.
Coupe d'une cellule.

de 250 A et supportant des tensions inverses pouvant atteindre 2 000 V. La fig. 95 est une « cellule » de 200 A à l'échelle 1/3. Le courant va du shunt de sortie relié au côté P de la jonction vers le pas de vis relié au côté N et vissé sur un radiateur (fig. 96).

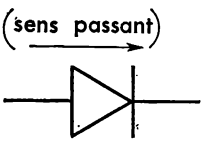
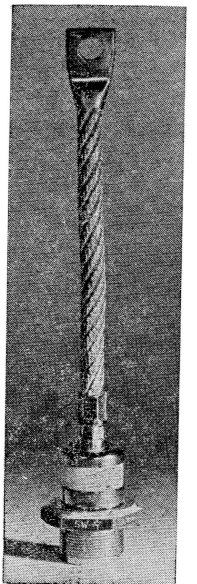


Fig. 94.
Symbole général.

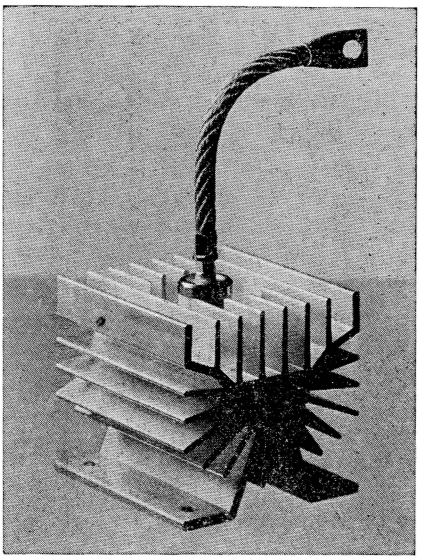
2° **Caractéristique directe.** — C'est la courbe $I = f(U)$ du courant direct obtenu dans le sens passant avec une **tension directe** dont le ⊕ est relié au semi-conducteur P de la jonction (fig. 97).

La caractéristique (fig. 98) a été obtenue avec une diode de 12 A. Jusqu à 0,6 V le courant est à peu près nul, puis il croît rapidement et à partir de 1,5 A environ la caractéristique est une droite.



Document C.D.S.W.

Fig. 95.
Cellule avec son shunt.



Document C.D.S.W.

Fig. 96. — *Cellule et son radiateur de refroidissement.*

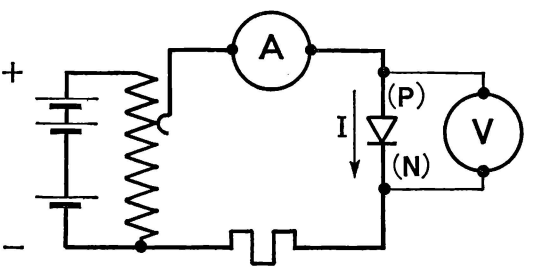


Fig. 97. — *Tracé de la caractéristique directe.*

3° **Seuil de tension.** — C'est la valeur de U qu'il faut appliquer pour obtenir un courant sensible. Pour la diode étudiée U = 0,6 V.

4° **Résistance directe.** — C'est le quotient d'une petite variation de tension ΔU par la variation de courant correspondante ΔI ; ces deux variations étant prises sur la partie rectiligne de la caractéristique :

$$\textbf{(14)} \qquad \boxed{R_d = \frac{\Delta U}{\Delta I}}$$

EXEMPLE. — Entre P et Q (fig. 98) on trouve $\Delta U = 0{,}032$ V et $\Delta I = 2$ A, soit $R_d = \frac{0{,}032}{2} = 0{,}016\ \Omega$.

La résistance directe est faible, elle serait encore moins grande pour une diode de 200 A.

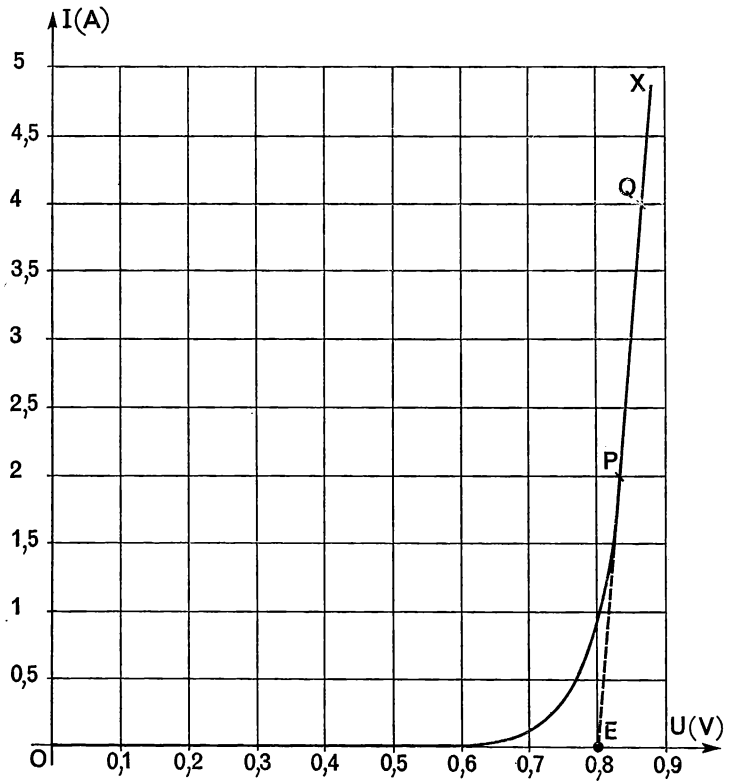


Fig. 98. — *Caractéristique directe.*

5° **Caractéristique simplifiée.** — Le prolongement de la partie rectiligne donne $E = 0{,}8$ V pour $I = 0$. La caractéristique simplifiée se compose des deux segments de droite OE et EX (fig. 98) : $I = 0$ pour $U < E$ et I proportionnel à U—E au delà : $I = \frac{U-E}{R_d}$ (pour $U > E$). La valeur $E = 0{,}8$ V est le **seuil de tension pratique.**

6° **Schéma équivalent.** — La formule précédente écrite $U = E + R_d I$ suggère de considérer la diode comme un récepteur de force contre-électromotrice E et de résistance R_d (fig. 99). Cette équivalence est parfaite dès que $I > 1{,}5$ A.

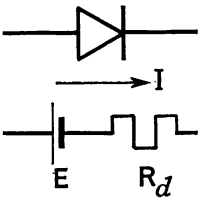


Fig. 99. — *Équivalence d'un redresseur.*

7° **Dissipation d'énergie dans la jonction.** — La puissance dissipée [1] est $UI = EI + R_d I^2$, l'élévation de température qui en résulte limite le courant admissible. La chaleur est évacuée grâce au radiateur; pour obtenir des performances plus élevées on ventile celui-ci.

43. *Caractéristique inverse d'une diode à jonction.*

1° **C'est la courbe I = f (U)** du courant inverse obtenu dans le sens non passant avec une **tension inverse** dont le ⊕ est relié au semi-conducteur N de la jonction (fig. 100). Ce courant dû aux seuls porteurs minoritaires reste très faible. Avec la diode précédente il est de 25 μA pour 400 V (fig. 101).

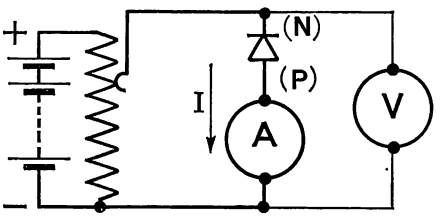


Fig. 100. — *Tracé de la caractéristiques inverse.*

Ce courant peut être négligé dans les utilisations. Cependant si l'on applique des tensions de plus en plus élevées le courant atteint quelques mA puis croît brusquement et la jonction « claque ».

2° **Résistance inverse.** — C'est le quotient $R_i = \dfrac{\Delta U}{\Delta I}$, elle est très élevée, la caractéristique étant au début à peu près rectiligne [2] on a $\Delta U = 400$ V et $\Delta I = 25$ μA.

$$R_i = \frac{400}{25} = 16 \text{ M}\Omega$$

(1) Nous ne faisons — provisoirement — pas de distinction entre valeur efficace et valeur moyenne.

(2) C'est une caractéristique effectivement relevée avec une diode.

3° **Tension inverse maximale.** — C'est la valeur U_{im} qu'il ne faut pas dépasser en cours d'utilisation. Les constructeurs la déterminent en fixant une limite au courant inverse : 5 mA à froid par exemple.

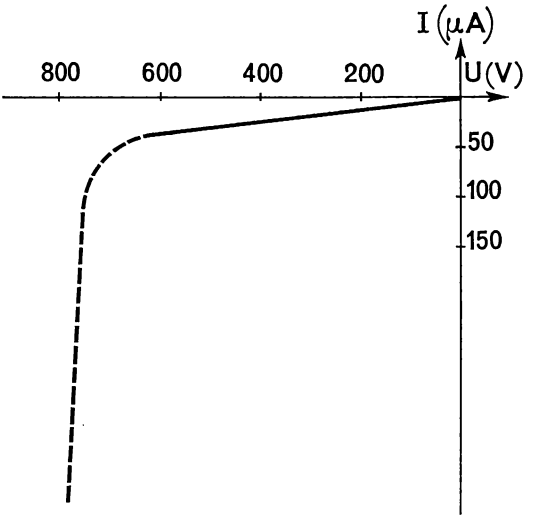


Fig. 101. — *Caractéristique inverse.*

4° **Claquage d'une jonction.** — *a*) Si l'on fait croître la tension inverse U_i appliquée à une jonction, celle-ci claque lorsque U_i atteint une valeur appelée **tension de claquage;** le courant inverse croît alors rapidement d'une valeur négligeable (quelques μA) à une valeur importante.

Selon les conditions du claquage, la jonction peut être définitivement détruite ou au contraire se reconstituer d'elle-même après suppression des conditions de claquage.

b) *Claquage par effet thermique :* les puissances dissipées dans la jonction, tant dans le sens direct que dans le sens inverse, échauffent celle-ci ; si le refroidisement est insuffisant la température de la jonction s'élève, il y a accroissement du nombre de paires électron-trou, donc du nombre de porteurs minoritaires et par suite du courant inverse et de la puissance dissipée. Le phénomène est cumulatif (emballement thermique) et entraîne la destruction de la jonction s'il n'est pas arrêté à temps.

c) *Claquage par effet d'avalanche :* les minoritaires (électrons) qui traversent la jonction ont une énergie qui croît avec la tension, quand

cette énergie est suffisante ils peuvent ioniser un ou plusieurs atomes, libérant ainsi d'autres électrons qui à leur tour produiront des ionisations. On a une véritable réaction en chaîne, l'ionisation est cumulative et fait « boule de neige » comme dans une avalanche. La croissance du nombre de porteurs libres entraîne celle du courant inverse.

d) *Claquage par effet de champ ou « effet Zener »* : le champ électrique croît avec la tension et à partir d'une certaine valeur il est suffisant pour rompre des liaisons dans le cristal ; le nombre de porteurs croît rapidement ainsi que le courant inverse.

e) Après le claquage par effet d'avalanche ou effet Zener, la résistance inverse est pratiquement nulle et la caractéristique inverse devient sensiblement parallèle à l'axe des courants (fig. 101). Si la résistance du circuit en série avec la diode est faible le courant devient très grand et la jonction est détruite. Si la résistance du circuit est suffisante pour limiter le courant à une valeur qui n'entraîne pas sa destruction, la jonction se reconstitue d'elle-même à la suppression de la tension.

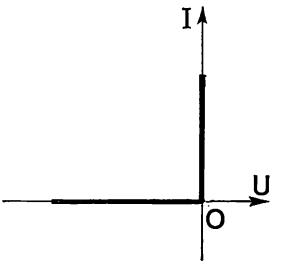


Fig. 102.
Caractéristique simplifiée.

5° Si l'on trace les deux caractéristiques directe et inverse à la même échelle et sur les mêmes axes, pour la partie utilisable de la diode on obtient pratiquement deux demi-droites confondues avec les axes : **pour la diode idéale la chute de tension directe et le courant inverse sont nuls** (fig. 102). On peut dire qu'un redresseur sec est un **court-circuit dans le sens passant et un interrupteur ouvert dans le sens inverse.**

EXERCICES

7. 01. — Le seuil pratique d'un redresseur est 1 V et sa résistance directe 0,01 Ω. Quelle est la chute de tension pour un courant de 40 A? [1,4 V].

7. 02. — Quelle est la puissance dissipée dans le redresseur précédent? [56 W].

7. 03. — Le courant inverse d'un redresseur est 50 μA pour une tension de 200 V. Calculer la résistance inverse [4 MΩ].

7. 04. — On relève deux points de la partie rectiligne de la caractéristique directe d'un redresseur : A (10 A; 0,92 V) et B (30 A; 0,96 V). Déterminer le seuil pratique E et la résistance directe [0,9 V et 0,002 Ω].

7. 05. — Avec les relevés ci-dessous, tracer la caractéristique directe d'une petite diode, déterminer sa résistance et donner les éléments E et R_d du schéma équivalent.

U (V) . .	0	0,6	0,7	0,8	0,85	0,9	0,95	1
I (mA) .	0	0	10	40	75	150	500	1 000

7. 06. — Même énoncé que le problème précédent (grosse diode).

U (A) . .	0	0,5	0,6	0,7	0,75	0,8	0,85	0,90
I (A) . .	0	0	1	4	7,5	15	50	100

8

DIODE A VIDE

44. *Étude du courant anodique.*

1° **Rappel.** — Le tube diode nous a servi à l'étude de l'émission thermoélectronique (chap. 2). Nous savons qu'une seule de ses électrodes — le filament — étant chauffée, il ne conduit que dans un seul sens. Nous nous proposons d'étudier plus en détail ses propriétés.

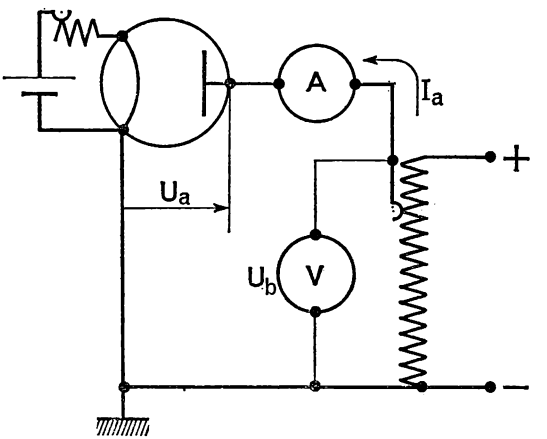


Fig. 103. — *Montage* ($U_a = U_b$).

2° **Montage.** — Une source de tension continue réglable délivre une tension U_b dans le circuit anodique. En négligeant la chute de tension dans l'ampèremètre on aura $U_a = U_b$ (fig. 103). Le plus souvent cette source est une alimentation stabilisée (fig. 104) qui fournit une tension pouvant varier de 0 à 300 ou 400 V grâce à un potentiomètre. Un rhéostat permettra de régler le courant dans le filament, donc, la température de ce dernier.

REMARQUE. — La saturation signalée ci-dessous sera facilement obtenue avec le tube expérimental MAZDA 78A, spécialement fabriqué

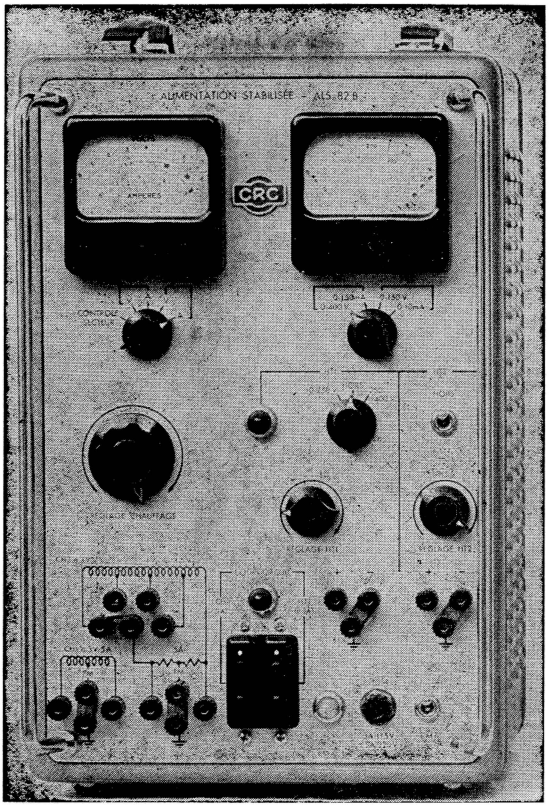


Photo C.R.C. Saint-Étienne.

Fig. 104. — *Alimentation stabilisée.*

pour l'enseignement. On peut également obtenir la saturation avec un tube normal en réduisant de 40 à 50 % la tension de chauffage.

3° **Tension anodique (U_a).** — C'est la différence des potentiels de l'anode A et de la cathode K :

$$U_a = V_a - V_k$$

Dans de nombreux cas, la cathode est reliée au châssis métallique sur lequel est réalisé le montage, on dit que la cathode est « **à la masse** » et son potentiel est considéré comme nul :

$$V_k = 0 \Rightarrow U_a = V_a$$

4° Variations du courant anodique avec U_a. — Caractéristique statique. — Pour un chauffage donné du filament faisons varier U_a et traçons la caractéristique statique $I_a = f(U_a)$. La courbe comporte deux parties nettement distinctes (fig. 105) :

— de O à A, le courant croît plus vite que la tension (allure parabolique) ;

— de B à C, le courant est pratiquement indépendant de la tension, il a atteint sa valeur de **saturation I_s**.

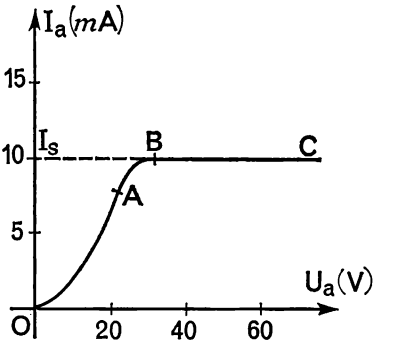


Fig. 105. — *Caractéristique statique.*

De O à A, la courbe est assez bien représentée par la fonction :

$$I_a = G U_a^{3/2} \text{ (Loi de Child-Langmuir)}$$

Son allure est intermédiaire entre la droite et la parabole. La constante G est appelée **pervéance** de la diode.

REMARQUES. — I. Pour $U_a = 0$ le courant n'est pas tout à fait nul (quelques microampères), des électrons arrivent à avoir assez d'énergie pour gagner l'anode. Il faut appliquer une tension U_a de — 2 V environ (anode négative) pour annuler ce courant.

II. Le courant de saturation croît très légèrement avec la tension U_a car l'augmentation de cette dernière facilite la sortie des électrons.

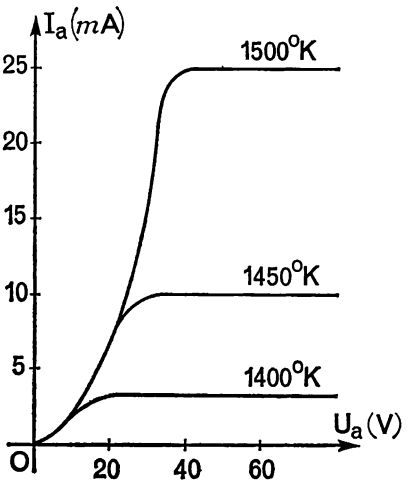


Fig. 106. — *Influence de la température de cathode.*

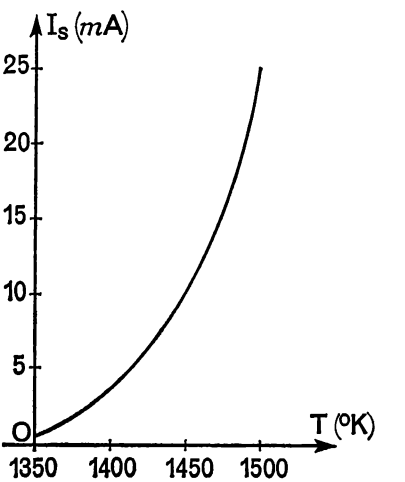


Fig. 107. *Variations de I_s avec T.*

5° Influence de la température de K. — Si l'on augmente la tension de chauffage c'est-à-dire la température de la cathode, la partie OA se prolonge et le courant de saturation est plus élevé (fig. 106). Il en résulte que : 1. Tant que le courant est faible il ne dépend que de la tension anodique. 2. La valeur du courant de saturation ne dépend que de la température de la cathode.

La valeur du courant de saturation est une fonction fortement croissante de la température absolue du filament (fig. 107).

45. *Justification de la saturation.*

1° A une température donnée, le nombre d'électrons pouvant être émis par une cathode n'est pas illimité. — Supposons qu'il soit $N = 10^{17}$ élect./s. Tant que le prélèvement d'électrons dans la charge d'espace par l'anode est inférieur à ce nombre, il est compensé par une sortie en nombre égal d'électrons du métal et il n'y a pas de saturation. Par contre, dès que l'anode prélève ces 10^{17} électrons en une seconde, la cathode peut tout juste les remplacer pendant le même temps et ne peut en fournir davantage même si l'on augmente U_a : la saturation est atteinte. Avec le nombre choisi, le courant de saturation serait (formule 8) :

$$I_s = Ne = 10^{17} \times 1{,}6 \times 10^{-19} = 1{,}6 \times 10^{-2} = 16 \text{ mA}$$

2° Pouvoir émissif d'une cathode. — Il dépend de sa nature, de sa surface et de sa température. Il est donné par la formule (Loi de Richardson-Dushmann) :

$$\boxed{J_s = AT^2 \varepsilon^{-eV_s/kT}}$$

où A est un coefficient dépendant du métal ;

V_s est le potentiel de sortie.

T la température absolue en °K.

ε est la base des logarithmes népériens [1], $\varepsilon = 2{,}718\ldots$

$e = 1{,}6 \times 10^{-19}$C, $k = 1{,}38 \times 10^{-23}$J/°K (Boltzman).

J_s : densité maximale de courant émis en A/m².

La présence de T^2 et surtout celle de l'exponentielle en $-1/T$ justifie la croissance vertigineuse de J_s (et de I_s) (revoir fig. 107). Une cathode qui émet $I_s = 1$ µA à 1 000 °K émettrait 300 000 A à 2 000 °K!!!

(1) La présence de la charge *e* nous oblige à représenter cette base par une autre lettre.

46. *Résistance interne.*

1° **Résistance statique.** — Soit P un point de coordonnées U_a et I_a de la caractéristique statique (fig. 108), la résistance statique est le quotient $R = \frac{U_a}{I_a} = \frac{OA}{OB}$, elle présente peu d'intérêt. Sur la figure on lit OA = 12,5 V et OB = 35 mA donc $R = \frac{12,5}{35 \times 10^{-3}} = 357\,\Omega$.

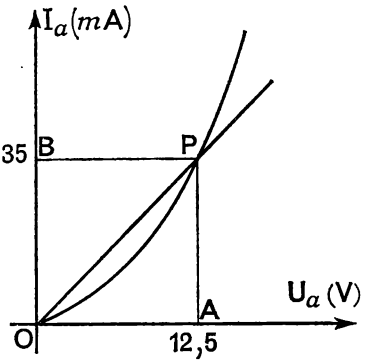


Fig. 108. — *Résistance statique.*

2° **Résistance interne (ou dynamique)** (1). — Considérons, sur la caractéristique statique d'un tube (fig. 109), une petite variation ΔU_a de la tension de part et d'autre d'un point P. Il lui correspond le long de la courbe une variation ΔI_a du courant, la résistance interne R_i est le quotient de l'une par l'autre :

(14 *bis*) $$\boxed{R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}}$$

ΔU_a	V	V
ΔI_a	A	mA
R_i	Ω	$k\Omega$

Remarque importante. — Dans les circuits à faible courant il est souvent pratique d'exprimer celui-ci en milliampères et les résistances en kilohms, les tensions restant en volts.

Pour avoir une valeur précise de R_i, les variations ΔU_a et ΔI_a doivent être aussi petites que possible. La vraie valeur de R_i est $\frac{dU_a}{dI_a}$, dérivée de U_a par rapport à I_a. Il est donc préférable de tracer soigneusement la tangente à la courbe et d'effectuer les lectures sur celle-ci.

(1) Cette définition est identique à celles de la résistance dynamique d'une RNL et de la résistance directe d'une diode à jonction.

3° **Exemples de détermination** (fig. 109). — *a*) Au voisinage de P on lit :

En A	En B	AB	R_i
11,3 V	12,8 V	$\Delta U_a = 1{,}5$ V	$\frac{1{,}5}{5\times10^{-3}} = 300\ \Omega$
25 mA	30 mA	$\Delta I_a = 5$ mA	

b) Sur la tangente CD en Q

En C	En D	CD	R_i
4,1 V	8,3 V	$\Delta U_a = 4{,}2$ V	$\frac{4{,}2}{10\times10^{-3}} = 420\Omega$
5 mA	15 mA	$\Delta I_a = 10$ mA	

4° **Relation avec la pente de la courbe.** — On dit souvent à tort, que si α est l'angle de la courbe et de la parallèle à l'axe OU_a la résistance interne est l'inverse de la pente, $R_i = \frac{1}{tg\alpha}$: c'est inexact. A la condition que les axes soient orthonormés [1], la tangente trigonométrique qui mesure la pente est le rapport de deux longueurs (nombre abstrait) tandis que la résistance est une grandeur physique qui dépend des échelles choisies. Si le centimètre, pris pour unité, représente x volts sur un axe et y ampères sur l'autre

quand $\alpha = 45^0$ et $tg\alpha = 1$ nous aurons (fig. 110), $R_i = \frac{x}{y}$

et pour $tg\alpha$ quelconque $R_i = \frac{x}{y}\times\frac{1}{tg\alpha}$, soit en posant

$$K = \frac{x}{y} = \frac{\text{nombre de volts pour 1 cm}}{\text{nombre d'ampères pour 1 cm}}$$

$$\boxed{R_i = \frac{K}{tg\alpha}}$$

(1) Orthonormés : les axes sont perpendiculaires et identiquement gradués (vecteurs unitaires de même module).

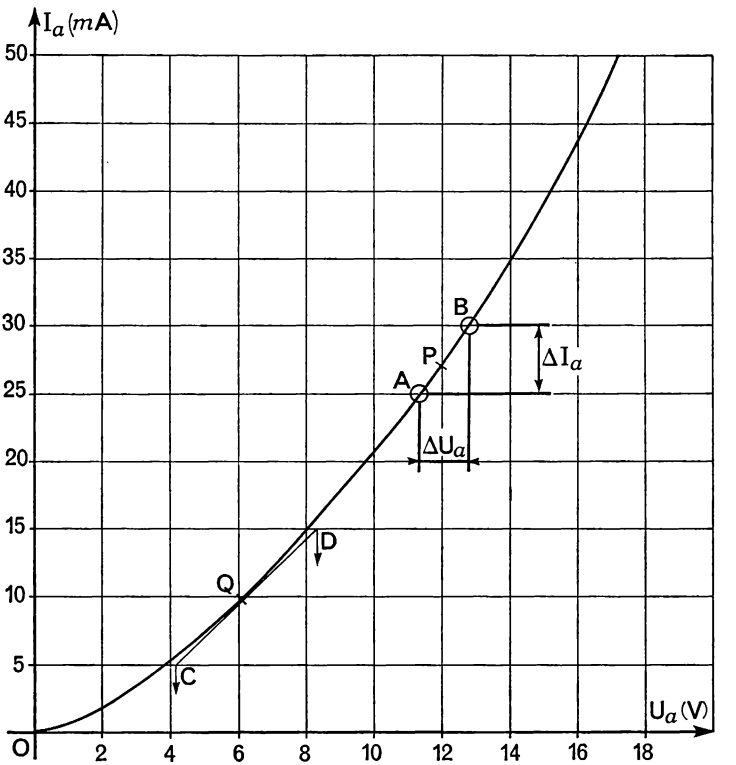


Fig. 109. — *Déterminations de la résistance interne (Tube 6X4).*

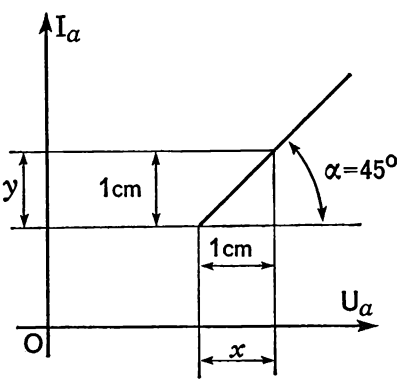


Fig. 110. — *Si tg* $\alpha = 1$, $R_i = \frac{x}{y}$.

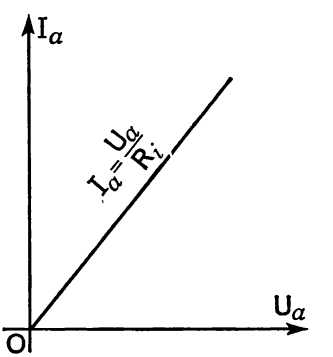


Fig. 111. — *Caractéristique idéalisée.*

On peut dire que R_i et $\frac{1}{tg\alpha}$ sont proportionnels, plus la courbe « monte » vite plus $tg\alpha$ est grande et plus R_i est petite. La résistance interne variera avec le point P choisi pour son calcul. On voit, sur la courbe 109, que lorsque I_a augmente, $tg\alpha$ augmente et par conséquent R_i diminue.

4° **Caractéristique idéalisée.** — On peut imaginer un tube diode idéal dont la caractéristique serait une droite passant par O (fig. 111). Le courant serait une fonction linéaire de la tension et la résistance interne, constante, se confondrait avec la résistance statique, son équation serait :

$$I_a = \frac{U_a}{R_i}$$

47. *Échauffement de l'anode.*

1° **Que devient la puissance fournie au tube?** — *a*) Le tube soumis à la tension U_a et traversé par le courant I_a reçoit une puissance

$$P_a = U_a I_a$$

que devient-elle?

b) A la pression des tubes à vide (10^{-6} mm de mercure), le libre parcours moyen d'une molécule d'azote est 45,6 m (chap. 1). Le L.P.M. d'un électron est encore plus grand : plus de 100 m ; aussi, compte tenu des dimensions des tubes à vide — 1 cm pour les petits et deux à trois décimètres pour les plus grands — il n'y a pratiquement pas de chocs à l'intérieur, donc pas non plus d'effet joule :

→ **Les électrons traversent le vide librement et n'y provoquent pas d'échauffement,** et par conséquent :

A LA RÉSISTANCE INTERNE D'UN TUBE A VIDE NE CORRESPOND AUCUN EFFET JOULE

c) Les électrons arrivent sur l'anode avec une grande vitesse [1] (plusieurs milliers de km/s) et en repartent, dans la portion de circuit extérieur au tube avec une vitesse presque nulle [2] (< 1 mm/s), on

(1) Voir Chapitre 3.
(2) Voir Chapitre 5.

peut dire que leur vitesse s'annule totalement sur l'anode. Leur énergie cinétique va donc s'y transformer en chaleur et l'anode s'échauffera.

→ **La puissance $P_a = U_a I_a$ est entièrement dissipée sur l'anode.**

d) REMARQUE. — Le produit $U_a I_a$ n'est autre que l'énergie cinétique des électrons, en effet si N est le nombre d'électrons arrivant sur l'anode, l'énergie totale est $\frac{1}{2} mv^2 N$ et comme (formules 8 et 7) :

$$N = \frac{I_a}{e} \quad \text{et} \quad \frac{1}{2} mv^2 = eU_a \quad \text{on a bien} \quad \frac{1}{2} mv^2 N = U_a I_a$$

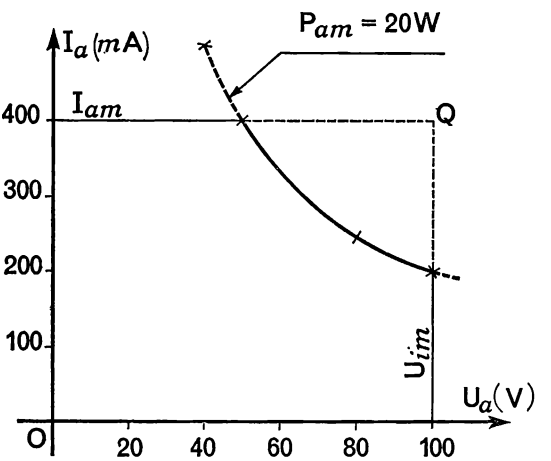


Fig. 112. — *Mise en place des limites d'un tube.*

2° **Puissance anodique maximale.** — Si le point de fusion était atteint le tube serait évidemment hors d'usage, mais il existe une autre limite : **l'anode ne doit pas atteindre la température à laquelle elle émettrait à son tour des électrons** sans quoi le tube conduirait dans les deux sens et deviendrait sinon inutilisable, en tout cas inutile. Cette limite fixée par le constructeur, est définie par la **puissance anodique maximale P_{am}** que peut dissiper l'anode.

Lorsque l'on utilise un tube à vide, on doit respecter la condition :

$$\boxed{U_a I_a \leqslant P_{am}}$$

Pour augmenter les performances des gros tubes on leur adjoint un système de refroidissement : ventilation ou circulation d'eau. Les

petits tubes se refroidissent naturellement par conduction thermique et rayonnement.

3° Autres limites du tube.

a) *Courant cathodique* (= *anodique*) *maximal* I_{am}. — Limite au-delà de laquelle la cathode s'use trop rapidement.

b) *Tension inverse maximale.* — Quand la cathode est positive, le courant est nul mais le tube supporte néanmoins une tension dite inverse ; pour éviter les risques d'amorçage d'arc entre les deux électrodes, cette tension doit rester inférieure à un maximum U_{im}.

4° Mise en place des limites sur la caractéristique.

a) I_{am} : droite parallèle à l'axe des U_a.

b) U_{im} : droite parallèle à l'axe des I_a.

c) P_{am} : la courbe $I_a = \dfrac{P_{am}}{U_a}$ avec $P_{am} = C^{te}$ est une hyperbole : c'est **l'hyperbole de dissipation maximale.**

Finalement le quadrant U_a, I_a est ceinturé par trois frontières au delà desquelles le tube risque la destruction (fig. 112).

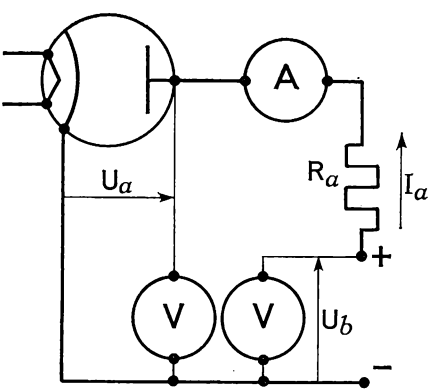


Fig. 113. — *Relevé de la caractéristique en charge. (Les sources ne sont plus représentées).*

48. *Caractéristique en charge.*

1° Montage. — Le tube est toujours alimenté par une tension continue (fig. 113). Une résistance de charge R_a est placée dans le circuit anodique. Deux voltmètres mesurent respectivement U_b et U_a.

2° Relation. — Appliquons la loi d'Ohm en négligeant la résistance de l'ampèremètre ; la tension U_b de la source est égale à la somme des deux tensions U_a du tube et R_aI_a de la résistance :

$$\textbf{(15)} \qquad \boxed{U_b = U_a + R_aI_a}$$

I_a en ampères
R_a en ohms
U_a et U_b en volts

3° **Courbe.** — C'est la fonction $I_a = f(U_b)$, courbe 1 de la fig. 114. Si l'on relève également la tension anodique, on retrouve évidemment pour un même courant I_a, la même valeur de U_a que dans la caractéristique statique (fig. 109). Cette dernière courbe est rappelée (courbe 2, fig. 114). Pour un courant donné, la distance horizontale des deux courbes

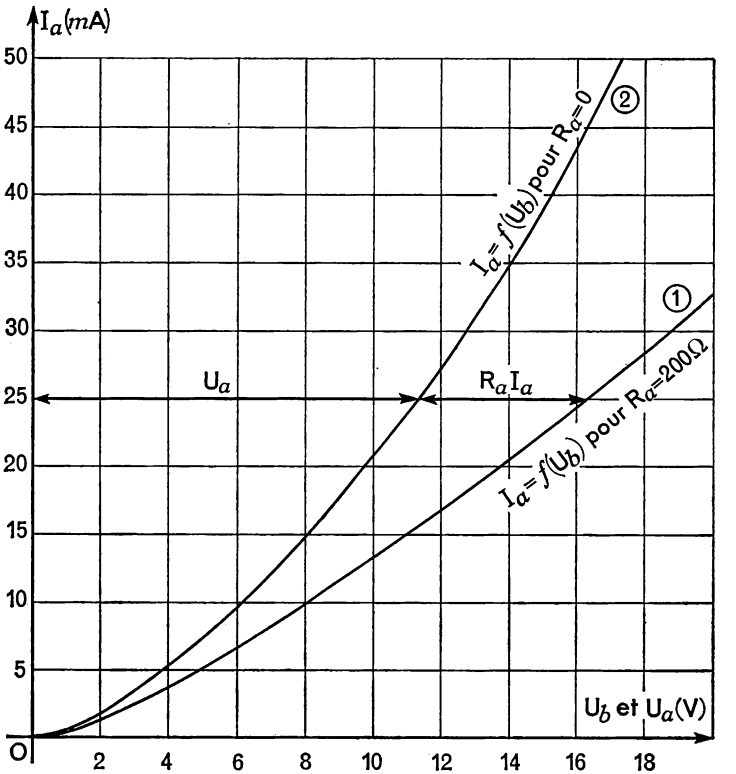


Fig. 114. — *Caractéristique en charge.*

est $U_b - U_a = R_a I_a$. Il est donc possible de tracer une caractéristique en charge en ajoutant aux abscisses de la caractéristique statique le produit $R_a I_a$. Nous donnons ci-dessous les valeurs relevées expérimentalement pour le tracé de la courbe $I_a = f(U_b)$ et les valeurs de U_b calculées avec la formule 15, la résistance R_a était de 200 Ω.

Notons que la caractéristique statique n'est autre que la caractéristique en charge correspondant à $R_a = 0\,\Omega$. C'est pourquoi on l'appelle aussi caractéristique en court-circuit.

U_b mesuré	0	4,8	8,2	11	13,7	16,4	18,7	21
I_a mesuré	0	5	10	15	20	25	30	35
U_a mesuré	0	3,8	6,2	8	9,6	11,3	12,8	14
R_aI_a calculé	0	1	2	3	4	5	6	7
$U_b = U_a + R_aI_a$ . . .	0	4,8	8,2	11	13,6	16,3	18,8	21

49. *Compléments technologiques.*

1° Qualités d'une cathode. — La formule de Richardson $J_s = AT^2\varepsilon^{-eV_s/kT}$ nous montre que pour avoir J_s grand il faut avoir : A grand, V_s petit, T grand.

En outre la cathode doit avoir une longue durée de vie, c'est-à-dire fonctionner pendant des milliers d'heures avant d'être hors d'usage, il faut donc concilier cette condition et la température de fonctionnement.

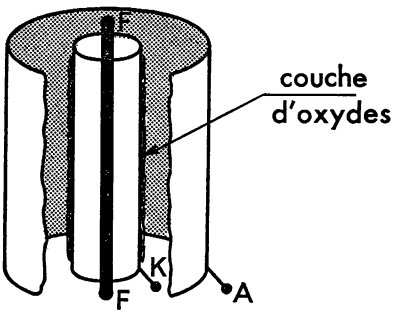


Fig. 115. — *Cathode à oxydes.*

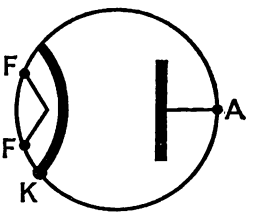


Fig. 116. — *Symbole d'un tube à chauffage indirect.*

2° Différents types de cathodes.

Substances	A (A/m²)	V_s (V)	T (°K)	J_s (A/m²)
Tungstène	600 000	4,5	2 600	10 000
Tungstène thorié	30 000	2,6	1 900	20 000
Cathodes à oxydes . . .	1 000	1	1 100	5 000

Les cathodes à oxydes sont obtenues en recouvrant un tube de tungstène ou de nickel par un mélange d'oxydes de calcium, de strontium et de baryum (fig. 115). Avec ces cathodes le **chauffage est indirect** : le filament et la cathode sont deux électrodes distinctes (fig. 116), le premier chauffant la seconde par rayonnement. Les cathodes à oxydes nécessitent un chauffage moins important, que les cathodes en tungstène, elles sont utilisées dans les tubes de petites puissances (récepteurs radio et télévision). Avec un chauffage normal la saturation ne peut être atteinte avec ces cathodes car elles seraient détruites avant.

3° **Avantages du chauffage indirect.**

a) Le circuit de chauffage est indépendant du circuit anodique.

b) Il n'y a plus de tension entre les bornes de la cathode : *elle est équipotentielle.*

c) La plus grande inertie thermique de la cathode autorise le chauffage en alternatif 50 Hz.

4° **Efficacité d'une cathode.** — C'est le quotient du courant maximal qu'elle peut émettre par la puissance qu'elle consomme pour son chauffage. Par exemple, pour le tube 6X4 :

$$I_{am} = 90 \text{ mA} \qquad P = 3{,}8 \text{ W} \qquad \text{efficacité} = \frac{90}{3{,}8} = 24 \text{ mA/W}$$

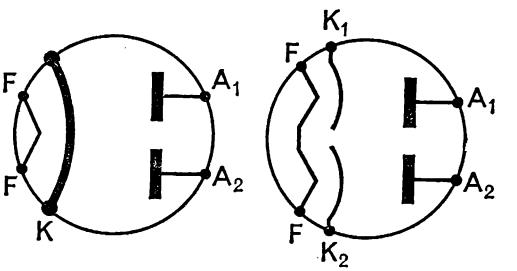


Fig. 117. — *Tubes bivalves.*

5° **Tubes bivalves.** — Ils sont pourvus de deux anodes et d'une ou deux cathodes (fig. 117). Ils permettent ainsi un redressement double alternance avec un encombrement plus réduit que si l'on faisait appel à deux tubes monovalves.

6° **Quelques tubes utilisés en réception :**

6X4 . 5Y3GB . GZ32 . EB91

Le premier chiffre, ou la première lettre précise la tension de chauffage :

6 = 6,3 V 5 = 5 V G = 5 V E = 6,3 V

Le dessin du support de la fig. 18, vu du dessous, indique les liaisons entre les électrodes et les broches (fig. 118).

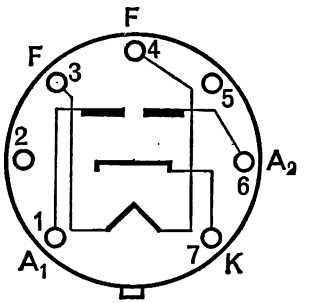


Fig. 118. — *Brochage du tube 6X4 (2 anodes). Les broches 2 et 5 sont inutilisées.*

EXERCICES

8. 01. — Calculer le courant de saturation d'une cathode de 0,1 cm^2 de surface pour $J_s = 5\,000$ A/m^2 [50 mA].

8. 02. — Pour une tension de 25 V une diode fournit 100 mA. Calculer la pervéance du tube [$0{,}8 \times 10^{-3}$].

8. 03. — La pervéance d'un tube est $G = 10^{-3}$, calculer le courant obtenu pour les tensions suivantes (V) : 10-15-20-25-30-35 et tracer la courbe $I_a = GU_a^{3/2}$.

8. 04. — Au voisinage d'un point d'une caractéristique statique on relève $\Delta U_a = 4$ V, $\Delta I_a = 20$ mA. Calculer R_i [200 Ω].

8. 05. — Déterminer la résistance interne en trois points de la courbe obtenue à l'exercice 8.03.

8.06. — La puissance maximale dissipable par l'anode d'un tube est 5 W. Calculer les courants admissibles pour les tensions suivantes : 10 V, 20 V, 30 V, 40 V [0,5 A .....].

8. 07. — Une anode de 1 g et de chaleur massique $c = 100$ J/°C.kg reçoit une puissance de 2 W. Quel serait l'échauffement en 1 mn s'il n'y avait pas de refroidissement? [1 200 °C].

8. 08. — Une anode reçoit 10^{17} électrons en 1 seconde. La tension anodique est $U_a = 30$ V. Calculer l'énergie dissipée en chaleur par seconde [0,48 J].

8. 09. — La tension anodique d'un tube diode est $U_a = 50$ V. Quelle est la vitesse des électrons arrivant sur l'anode? [4 200 km/s].

8. 10. — La distance entre les deux électrodes (K et A) d'un tube diode est 1 cm et la tension $U_a = 50$ V. Quelle est la durée de traversée du tube par un électron? [4,76 ns].

8. 11. — Quel est en joule le travail d'extraction de 10^{18} électrons pour $V_s = 2{,}4$ V? [0,384 J].

8. 12. — Un tube diode est alimenté en continu par une tension $U_b = 100$ V. La résistance de charge est $R_a = 250\ \Omega$ et le courant $I_a = 180$ mA. Calculer U_a [55 V].

8. 13. — Calculer la grandeur inconnue de chaque colonne du tableau :

U_a (V) ..	40	25			35	45	30	50
R_a (Ω) .	300	400	250	160			500	200
I_a (mA) .	100	80	240	300	70	150		
U_b (V) ..			100	90	70	120	50	170

8. 14. — Connaissant la caractéristique statique d'un tube, tracer sa caractéristique en charge pour $R_a = 350\ \Omega$.

I_a (mA) . .	27	64	125	216	343
U_a (V) . . .	9	16	25	36	49

PROBLÈMES

I. AVEC SOLUTION.

8. 15. — Une cathode possède les caractéristiques suivantes :
$A = 30\,000$ A/m^2, $V_s = 2{,}5$ V, surface émissive 10 cm^2.

1° Calculer le courant de saturation correspondant aux températures absolues suivantes (°K) : 1 000 - 1 300 - 1 600 - 1 900.

2° Cette cathode est utilisée dans un tube pour lequel on a relevé la caractéristique statique suivante :

U_a (V) . . .	9	16	25	36	49
I_a (mA) . .	27	64	125	216	343

a) Calculer la pervéance du tube.

b) Tracer la caractéristique et déterminer la résistance interne pour chaque valeur donnée du courant.

c) Tracer la courbe $R_t = f(I_a)$.

3° Déterminer pour chaque valeur du courant la puissance calorifique reçue par l'anode et son échauffement en 1 minute : masse M = 30 g, chaleur massique $c = 140$ J/°C.kg.

— Solution —

1° Courant de saturation : $\frac{I_s}{S} = J_s = AT^2 \varepsilon^{-eV_S/kT}$

$$\frac{eV_S}{k} = \frac{1{,}6\times10^{-19}\times2{,}5}{1{,}38\times10^{-23}} = 29\,000 \qquad S = 10^{-3}m^2 \qquad A = 30\,000$$

$$I_s = AST^2 \varepsilon^{-eV_S/kT} = 30T^2\varepsilon^{-29\,000/T} = \frac{30T^2}{\varepsilon^{29\,000/T}}$$

T	1 000	1 300	1 600	1 900
$30\,T^2$	30×10^6	$50{,}7\times10^6$	$76{,}8\times10^6$	108×10^6
$\varepsilon^{29\,000/T}$	$3\,900\times10^9$	$4{,}8\times10^9$	$0{,}073\times10^9$	$0{,}0042\times10^9$
I_s (mA)	$7{,}7\times10^{-3}$	10,5	1 050	25 700

2° *a*) $G = \frac{I_a}{U_a^{3/2}} = \frac{27\times10^{-3}}{9\sqrt{9}} = 10^{-3}$;

b) Courbe fig. 119. On relève :

I_a	27	64	125	216	343
R_t (Ω)	220	175	130	110	95

par exemple pour $I_a = 64$ mA (point P). $\Delta I_a = 60$ mA et $\Delta U_a = (22{,}5 - 12) = 10{,}5$ V ;
$R_t = \frac{10{,}5}{60\times10^{-3}} = 175\ \Omega$

c) Courbe fig. 120.

3° $P_a = U_aI_a$

$$\Delta t = \frac{60U_aI_a}{Mc} = \frac{60U_aI_a}{30\times10^{-3}\times140} = 14{,}3\times U_aI_a$$

I_a	27	64	125	216	343
U_aI_a(W)	0,243	1,02	3,12	7,8	16,8
Δt (°C)	3,5	14,5	44,5	111	240

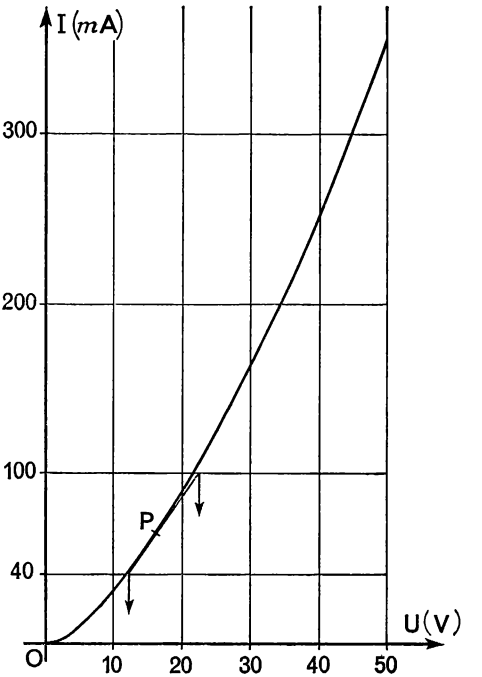


Fig. 119.

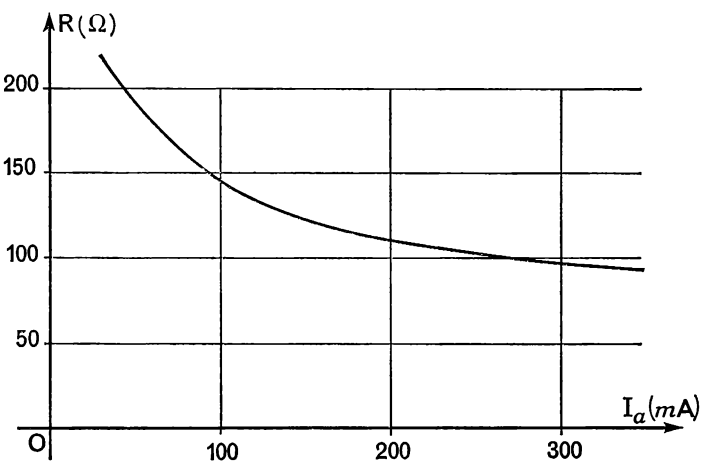


Fig. 120.

A RÉSOUDRE.

8. 16. — On donne la caractéristique statique d'un tube :

U_a (V) ..	10	20	30	40	50	60	70
I_a (mA).	16	45	82	125	175	235	295

Tracer la courbe et placer l'hyperbole de dissipation maximale pour $P_{am} = 10$ W.

Déterminer graphiquement la résistance interne pour les courants donnés et tracer la courbe $R_i = f(I_a)$.

8. 17. — Même problème avec $P_{am} = 15$ W et le tableau suivant :

U_a (V)..	5	10	15	20	25	30	40	50
I_a (mA)	14	38	71	108	150	200	300	420

8. 18. — Une cathode en tungstène, dont la surface émissive est 1 cm^2, a pour tension d'extraction $V_s = 4{,}5$ V et pour coefficient $A = 6 \times 10^5$. Calculer le courant de saturation pour les températures suivantes (^{0}K) : 2 000-2 200-2 400-2 600 [pour 2 600 : 0,83 A environ].

8. 19. — La pervéance G d'un tube est $0{,}8 \times 10^{-3}$. Tracer la courbe $I_a = f(U_a)$ pour U_a(V) : 10-20-30-30-50. Montrer que la résistance interne peut être exprimée en ohms par la formule $R_i = \dfrac{2}{3\,G\sqrt{U_a}}$ et calculer sa valeur pour les tensions données. Relever R_i sur la courbe pour les mêmes tensions et comparer aux calculs.

9

PROPRIÉTÉS DES DIODES

50. *Diverses diodes et caractéristiques courant-tension.*

1° **Définition.** — On appelle diode tout élément ayant la propriété d'être conducteur pour un certain sens de courant et non conducteur pour l'autre sens.

Le sens passant du courant est appelé direct, l'autre sens est le sens inverse.

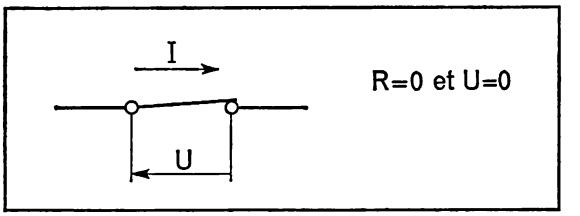


Fig. 121. — *Diode idéale dans le sens passant.*

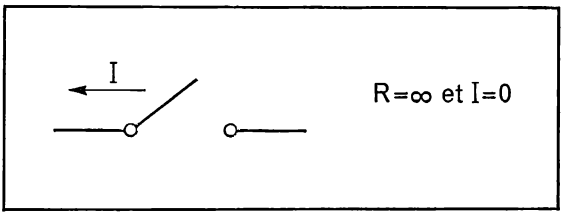


Fig. 122. — *Diode idéale dans le sens inverse.*

2° **Diode idéale.** — a) *Dans le sens passant :* elle est parfaitement conductrice, sa résistance directe est nulle, la chute de tension qu'elle produit est nulle ; on peut dire qu'elle est équivalente à un interrupteur fermé (fig. 121).

b) *Dans le sens inverse :* elle est parfaitement isolante, sa résistance inverse est infinie, le courant qui la traverse est nul ; on peut dire qu'elle est équivalente à un interrupteur ouvert (fig. 122).

c) *Caractéristique* (fig. 123) : elle résulte de ses propriétés,
— dans le sens direct la tension est nulle quel que soit le courant ;
— dans le sens inverse le courant est nul quelle que soit la tension.

3° Diode à jonction.

a) *Dans le sens passant :* la chute de tension produite a deux origines :
— RI due à la résistance directe ;
— E, tension de seuil.

Le total $U = E + RI$ ne dépasse guère 2 V pour le courant nominal I_N et ce quelle que soit la diode. On pourra négliger U dans la plupart des cas.

Diode	I_N	R_d	$R_d I_N$	E	U
Petite	0,5	2	1	0,7	1,7
Grosse	100	0,01	1	0,7	1,7

b) *Dans le sens inverse :* la résistance inverse n'est pas infinie mais atteint néanmoins un minimum de 100 kΩ dans le cas le plus défavorable, le courant inverse ne dépassera pas 1 mA dans les usages courants et sera largement négligeable devant le courant direct.

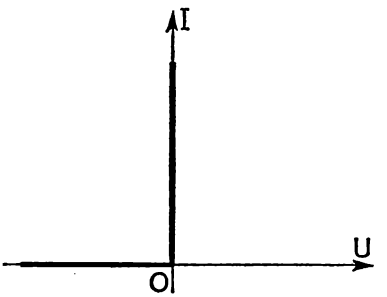


Fig. 123. — *Caractéristique idéale.*

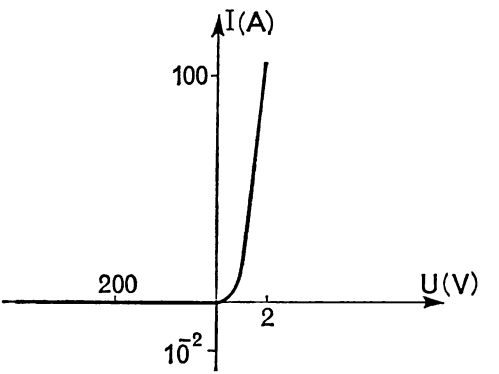


Fig. 124. — *Caractéristique d'une diode à jonction.*

c) *Caractéristique* (fig. 124) : elle est donnée pour une diode de 100 A avec des échelles différentes pour la partie directe et pour la partie inverse. On peut sans grande erreur la confondre avec la caractéristique idéale.

4° **Diode à vide.** — Elle est de moins en moins utilisée.

a) *Dans le sens passant :* la résistance directe est relativement importante, une cinquantaine d'ohms pour une diode de 0,5 A. La chute de tension est donc assez grande U = RI = 25 V et ne pourra être négligée.

b) *Dans le sens inverse :* la diode à vide est idéale le courant reste nul.

c) *Caractéristique :* son allure est rappelée (fig. 125) si; l'on peut admettre que la résistance interne est à peu près constante, la courbe sera remplacée par une droite passant par 0 et la chute de tension sera proportionnelle au courant (droite en traits interrompus).

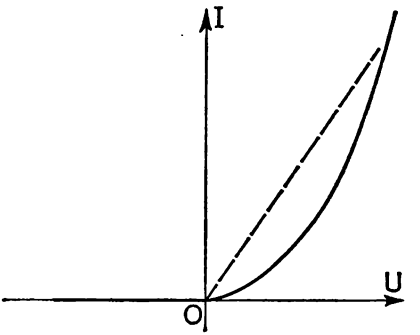


Fig. 125.
Caractéristique d'une diode à vide.

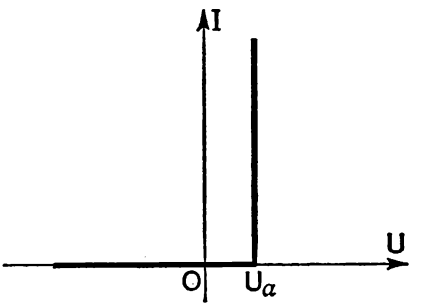


Fig. 126.
Caractéristique d'une diode à gaz.

5° **Diode à gaz** [1]. — Elle est de moins en moins utilisée.

a) *Dans le sens passant :* la résistance peut être négligée, mais la diode produit une chute de tension sensiblement constante, dite « **tension d'arc U_a** », de l'ordre de 10 V. Selon la valeur de la tension redressée elle sera ou ne sera pas négligée.

b) *Dans le sens inverse :* c'est une diode idéale, le courant reste nul.

c) *Caractéristique :* dans le sens direct c'est pratiquement une droite parallèle à l'axe des courants (fig. 126).

6° **Limites de fonctionnement d'une diode.**

a) *Courant moyen direct :* courant admissible, sans limitation de durée ; c'est le courant nominal.

(1) Une étude sommaire en est effectuée au chapitre 16.

b) *Courant maximal :* limite extrême que peut atteindre le courant pendant un temps très court, dix millisecondes par exemple.

c) *Tension inverse de service :* valeur admissible sans limitation de durée.

d) *Tension inverse maximale :* valeur pouvant être exceptionnellement appliquée sans destruction mais qui ne doit pas se répéter à chaque alternance.

51. *Rôle redresseur des diodes.*

1° **Courant unidirectionnel** (1). — Si une diode est placée dans un circuit alimenté par une tension alternative (fig. 127) le courant ne pourra passer que pendant l'alternance où l'anode de la diode est positive et sera nul pendant l'autre alternance : le courant sera unidirectionnel.

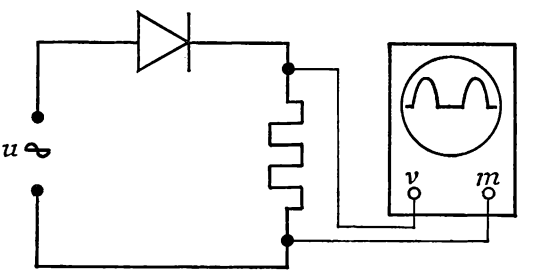


Fig. 127. — *La résistance est traversée par un courant unidirectionnel.*

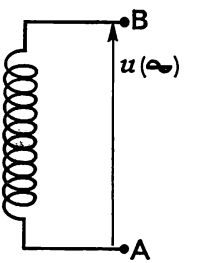


Fig. 128. — *La tension u est alternativement positive et négative.*

Nous allons effectuer une étude sommaire du redressement monophasé, monoalternance, avec charge résistante R. La source d'alternatif est soit le secteur, soit le secondaire d'un transformateur.

Nous appellerons alternance positive celle qui correspond au sens passant, l'autre sera dite négative.

La tension alternative u, sera symbolisée par un vecteur comme en continu. Quand le $\oplus$ est en B on a $u > 0$, et quand le $\oplus$ est en A, $u < 0$ (fig. 128).

Nous supposerons le courant inverse nul dans tous les cas.

(1) Unidirectionnel : qui ne circule que dans un seul sens mais qui n'est pas continu (continu = constant).

2° Diode idéale, diode à jonction. — a) *Elle est parfaitement conductrice et ne produit aucune chute de tension quand l'alternance est positive.*

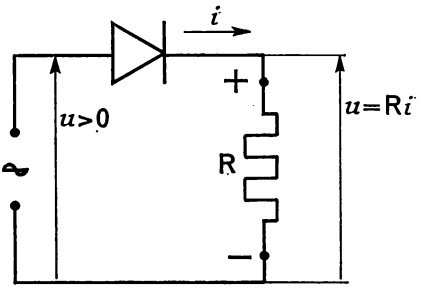


Fig. 129. — *Quand la tension u est positive u = Ri.*

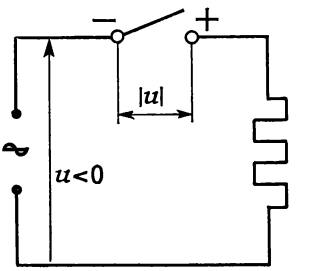


Fig. 130. — Quand la tension u est négative, elle se retrouve entre les bornes de la diode.

b) *Quand* u *est positive :* toute la tension $u = U_m \sin\omega t$ se retrouve entre les bornes de la résistance de charge (fig. 129) ; le courant est donc

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m \sin \omega t}{R}$$

$$\boxed{u > 0 \Rightarrow i = \frac{U_m \sin \omega t}{R}}$$

c) *Quand* u *est négative :* toute la tension est appliquée en inverse entre les bornes de la diode [1] (fig. 130). Le courant est nul et la tension entre les bornes de la charge aussi

$$\boxed{u < 0 \Rightarrow i = 0 \text{ et } u_a = u}$$

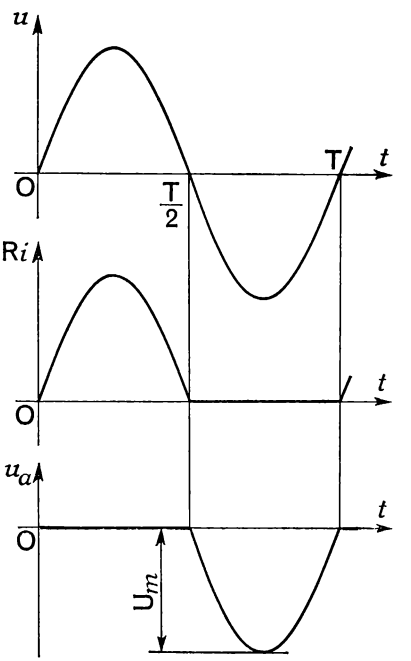


Fig. 131. — De haut en bas : *la tension sinusoïdale, la tension de la charge, la tension entre les bornes de la diode.*

(1) La tension entre les bornes de la diode est notée u_a.

d) *Les trois tensions:* u (alternative), Ri (charge) et u_a (diode) ont au cours d'une période l'allure indiquée fig. 131. A chaque instant on a évidemment $u = u_a + Ri$, les deux termes de la somme étant alternativement nuls. La tension inverse maximale appliquée à la diode est U_m.

3° **Diode à vide.** — *a*) Sa résistance interne R_d, supposée constante, produira une chute de tension $u_a = R_d i$ pendant les alternances positives.

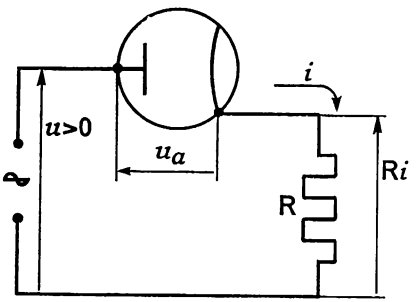


Fig. 132. — *Quand la tension u est positive,* $u = u_a + R_i$.

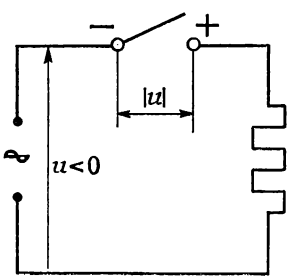


Fig. 133. — *La tension u négative se retrouve entre les bornes de la diode.*

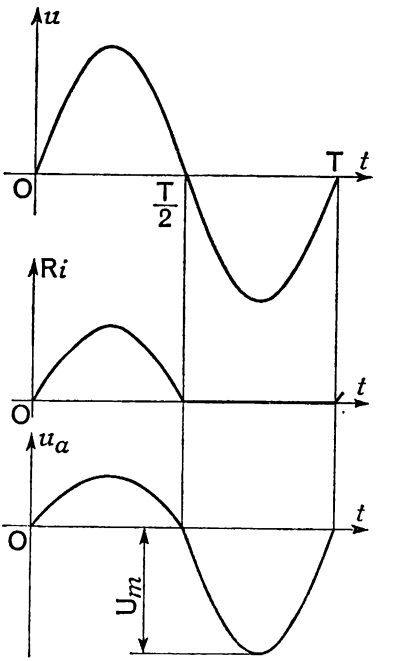


Fig. 134. — De haut en bas : *la tension sinusoïdale, la tension de la charge, la tension entre les bornes du tube.*

b) *Quand* u *est positive:* la loi d'Ohm appliquée au circuit donne (fig. 132) :

$$u = u_a + Ri = (R_d + R)i$$

Le courant est donc

$$i = \frac{u}{R_d + R} = \frac{U_m \sin \omega t}{R_d + R}$$

$$\boxed{u > 0 \Rightarrow i = \frac{U_m \sin \omega t}{R_d + R}}$$

c) *Quand* u *est négative :* toute la tension est appliquée en inverse entre les bornes de la diode (fig. 133). Le courant est nul et la tension entre les bornes de la charge aussi.

$$\boxed{u < 0 \Rightarrow i = 0 \text{ et } u_a = u}$$

d) Les trois tensions u, Ri et u_a sont précisées à la figure 134. A chaque instant $u = u_a + Ri$. La tension inverse maximale est U_m.

4° Diode à gaz. — *a*) Sa résistance interne est pratiquement nulle mais elle produit une chute de tension U_a de l'ordre de 10 V.

b) *Quand* u *est positive :* la loi d'Ohm (fig. 135) donne :

$$u = u_a + Ri$$

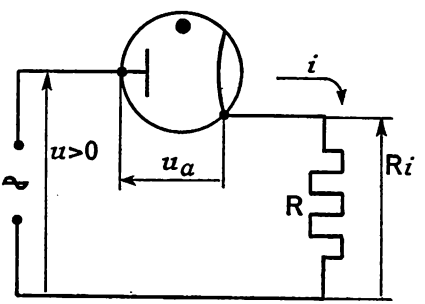


Fig. 135. — *Quand la tension u est positive* $u = u_a + R_i$.

α) $0 < u < U_a$: la diode ne conduit pas,

$$i = 0 \text{ et } u_a = u = U_m \sin \omega t$$

β) $u > U_a$: la tension entre les bornes de la diode est U_a et le reste est appliqué à la charge :

$$Ri = u - U_a \Rightarrow i = \frac{U_m \sin \omega t - U_a}{R}$$

γ) Quand u redevient plus petit que U_a, le tube ne conduit plus et le courant s'annule. On se retrouve dans les conditions du 1.

c) *Quand* u *est négative :* comme aux 2° et 3° on a,

$$u < 0 \Rightarrow i = 0 \quad \text{et} \quad u = u_a.$$

d) Les trois tensions u, u_a et Ri sont représentées fig. 136. La tension inverse maximale est encore U_m.

e) *Durée d'ouverture :* **c'est l'intervalle de temps pendant lequel le tube conduit.**

L'instant où le courant apparaît est appelé **instant d'ouverture,** l'instant où le courant s'annule est l'**instant de fermeture.** Ces deux instants sont symétriques par rapport à la valeur $\frac{T}{4}$ (T = période) et donnés par l'égalité :

$$U_a = u = U_m \sin\omega t \Rightarrow \sin\omega t = \frac{U_a}{U_m}$$

qui conduit à deux valeurs t_0 et $\frac{T}{2} - t_0$.

La durée d'ouverture est $\tau = \frac{T}{2} - 2\,t_0$.

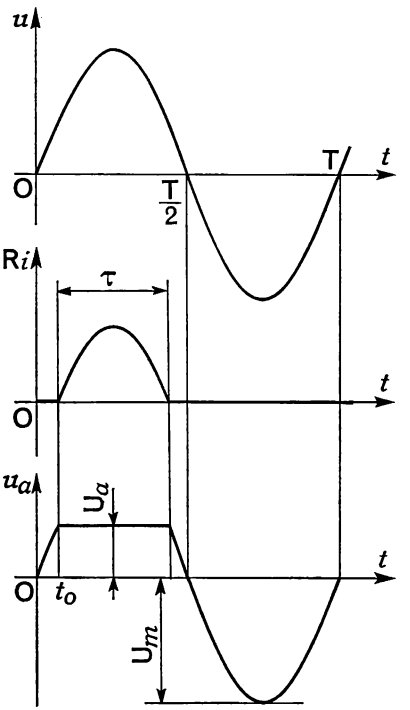


Fig. 136. — De haut en bas : *la tension sinusoïdale, la tension de la charge, la tension entre les bornes de la diode.*

L'angle d'ouverture est en radians :

$$\theta = \omega\tau = \frac{\omega T}{2} - 2\,\omega t_0 = \pi - 2\,\omega t$$

Pour les diodes à jonction et à vide, la durée d'ouverture était :

$$\tau = \frac{\pi}{2} \quad \text{et l'angle} \quad \theta = \pi$$

5° **Maximum de courant I_m.** — Il est obtenu quand $u = U_m$

a) *Diode idéale et diode à jonction :* $I_m = \frac{U_m}{R}$.

b) *Diode à vide :*

$$I_m = \frac{U_m}{R_a + R}.$$

c) *Diode à gaz :*

$$I_m = \frac{U_m - U_a}{R}.$$

6° **Courant moyen I_{moy}.** — Nous donnons les valeurs sans démonstration ; celles-ci seront effectuées en classe terminale.

a) *Diode idéale et diode à jonction :*

$$I_{moy} = \frac{I_m}{\pi} = \frac{U_m}{\pi R}$$

b) *Diode à vide :*

$$I_{moy} = \frac{I_m}{\pi} = \frac{U_m}{\pi (R_a + R)}$$

c) *Diode à gaz :*

$$I_{moy} \simeq \frac{U_m \cos \omega t_0}{\pi R} - \frac{U_a}{2R}$$

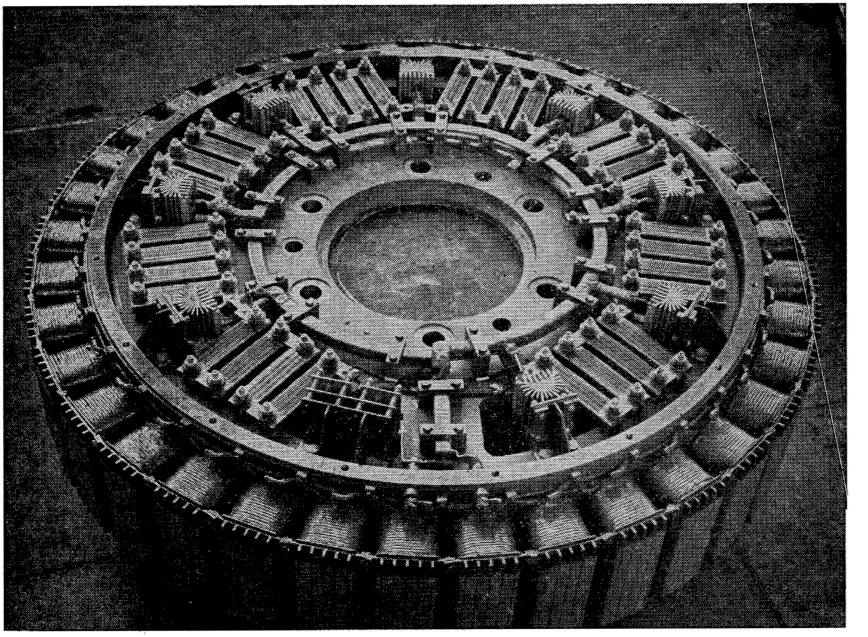


Photo Jeumont-Schneider.

Fig. 137. — *Rotor d'alternateur sans bague ni balai.*

REMARQUE. — Si $U_m \gg U_a$ on peut effectuer l'approximation $\cos \omega t_0 = 1$ d'où $I_{moy} = \frac{U_m}{\pi R} - \frac{U_a}{2R}$ et même, à la rigueur, négliger $U_a \ll U_m$ ce qui donne $I_{moy} \simeq \frac{U_m}{\pi R}$ comme pour une diode à jonction.

7° **Usages des diodes.** — Elles permettent, après filtrage, d'obtenir un courant sensiblement continu à partir d'alternatif. Rappelons que toute l'énergie est produite sous forme alternative et que de nom-

breux usages : traction électrique, électrométallurgie et électrochimie, nécessitent du continu.

Autrefois la transformation d'alternatif en continu était obtenue avec une commutatrice ou avec un groupe moteur alternatif-génératrice continu.

Aujourd'hui les diodes sont presque seules utilisées. Les diodes à gaz et à vide ne sont plus fabriquées que pour le remplacement dans les installations anciennes. Les installations actuelles sont faites avec des diodes à jonction ou mieux avec des redresseurs contrôlés (thyristors) qui délivrent une tension continue réglable.

C'est grâce aux diodes à jonction que l'on a pu remplacer l'excitatrice des alternateurs (génératrice tournante) par une excitation statique et que l'on a pu fabriquer des alternateurs sans bague ni balai (fig. 137) où les redresseurs tournent avec le rotor.

52. *Diode Zener.*

1° Constitution. — C'est une diode à jonction dont la caractéristique inverse fait un coude à angle droit (fig. 138) et qui supportera la tension de claquage sans être détruite (diode à avalanche contrôlée).

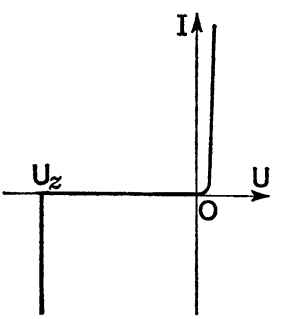


Fig. 138. — *Caractéristique d'une diode Zener.*

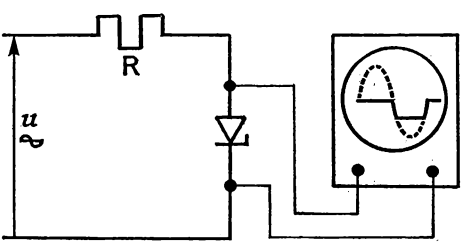


Fig. 139. — *Diode Zener en alternatif.*

2° Fonctionnement en continu. — Dans le sens direct elle se conduit comme une diode ordinaire. Dans le sens inverse le courant reste nul jusqu'à la tension U_z de Zener (tension de claquage) puis cette tension reste pratiquement indépendante du courant. On fabrique des diodes dont les tensions de Zener vont de quelques volts à quelques centaines. On peut admettre que la résistance directe est nulle et que, passée la valeur U_z, la résistance inverse est nulle aussi.

3° **Fonctionnement en alternatif.** — *a*) Si la tension u appliquée est telle que $U_m < U_z$, la diode est passante dans le sens direct et bloquante dans le sens inverse, elle ne présente aucun intérêt nouveau par rapport à la diode ordinaire.

b) Si $U_m > U_z$, dans le sens direct la diode peut être considérée comme idéale et la chute de tension est pratiquement nulle (fig. 139 et 140). Le courant est $i = \frac{u}{R}$.

Dans le sens inverse. — Pour $|u| < U_z$, la diode est non passante, la tension entre ses bornes est $u_z = u$ et le courant reste nul.

Pour $|u| > U_z$, la diode conduit avec une résistance inverse négligeable mais en produisant entre ses bornes une chute de tension $|u_z| = U_z = \text{Cte}$.

Le courant est $i = \frac{|u| - U_z}{R}$.

Les courbes de la fig. 140 donnent les allures des tensions u_z et Ri pour u sinusoïdal.

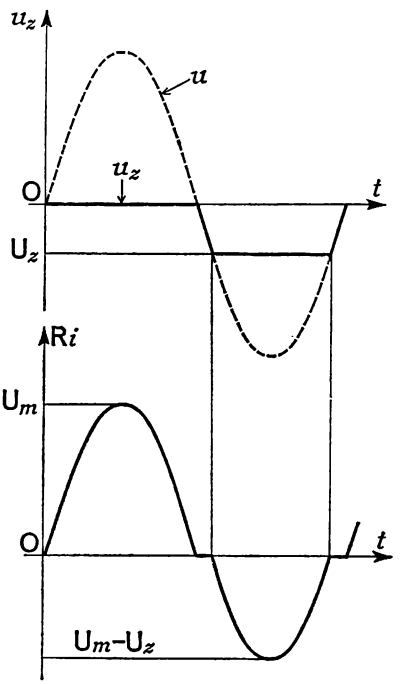


Fig. 140.
En haut, *tension de la diode.*
En bas, *tension de la résistance.*

4° **Applications.** — a) *Nous citons:* Stabilisation de tension — écrêtage de tension — régulation de tension — Protection d'appareils de mesure — Relai à seuil de tension — Temporisation — Dilatation d'échelle d'appareils de mesure.

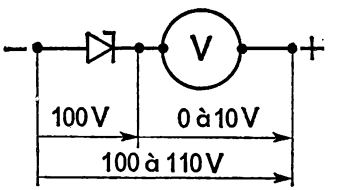


Fig. 141.
Voltmètre à échelle dilatée.

b) *Étude de la dilatation d'échelle:* Soit une tension U continue ne variant qu'entre 100 et 110 V, pour la mesurer on est obligé d'utiliser un voltmètre de calibre 150 V et la lecture sera peu précise. Mettons en série une diode Zener de 100 V avec un voltmètre de 10 V (fig. 141), toute l'échelle du

voltmètre est utilisée pour lire la tension complémentaire de 0 à 10. Si l'appareil comporte 150 divisions, une division correspond à $\frac{10}{150} = 0{,}067$ V au lieu de 1 V dans le premier cas.

EXERCICES

9. 01. — Une tension efficace de 220 V est appliquée à une résistance de 10 Ω en série avec une diode à jonction idéale. Calculer le courant moyen et la tension inverse maximale [10 A — 311 V].

9. 02. — Une tension efficace de 350 V est appliquée à une résistance de 500 Ω en série avec une diode de résistance interne constante $R_d = 200$ Ω. Calculer le courant moyen et la tension inverse maximale [0,225 A — 495 V].

9. 03. — Une tension efficace de 127 V est appliquée à une résistance de 10 Ω en série avec une diode à gaz chutant 10 V. Calculer le courant moyen et la tension inverse maximale en admettant que la durée d'ouverture est $\frac{T}{2}$ [5,2 A — 180 V].

9. 04. — Une diode Zener idéale ($U_z = 10$ V) est en série avec une résistance de 500 Ω. On lui applique une tension continue de 25 V : *a*) dans le sens direct ; *b*) dans le sens inverse. Quels sont les courants? [50 mA, 30 mA].

9. 05. — Une diode Zener idéale ($U_z = 50$ V) est en série avec une résistance de 1 000 Ω. On applique à l'ensemble une tension sinusoïdale dont la valeur maximale est 100 V. Quels sont les maximums des courants direct et inverse? [100 mA — 50 mA].

9. 06. — Une diode Zener ($U_z = 25$ V) est en série avec un voltmètre de calibre 3 V (fig. 141). On applique une tension continue de 27 V, quelle est l'indication du voltmètre? [2 V].

PROBLÈMES

A RÉSOUDRE.

9. 07. — Une diode à jonction est équivalente à un récepteur de f.c.é.m. 0,75 V en série avec une résistance directe de 0,015 Ω. Sa résistance inverse est 10 MΩ. On l'utilise dans un redressement monoalternance avec une charge résistante $R = 5$ Ω. La tension appliquée est $u = 127\sqrt{2} \sin 100\pi t$.

1° Calculer la valeur maximale de la tension entre les bornes de R. Pouvait-on négliger la chute de tension dans la diode?

2° Calculer le courant moyen dans la résistance.

3° Calculer la valeur maximale du courant inverse.

9. 08. — Une diode Zener idéale ($E = 0$ V, $R_d = 0\,\Omega$) est en série avec une résistance R de 2 kΩ. L'ensemble est alimenté par une tension sinusoïdale de valeur efficace $U = 120$ V, la tension U_z est 100 V. Déterminer les valeurs maximales du courant et de la tension de la résistance.

9. 09. — Deux diodes Zener en opposition sont utilisées dans le montage ci-contre (fig. 142). La tension de Zener d'une diode est 12 V, la chute de tension directe est négligée. La tension sinusoïdale *u* a une valeur efficace de 36 V.

1° Dessiner les courbes de tension de chaque diode et de la résistance.

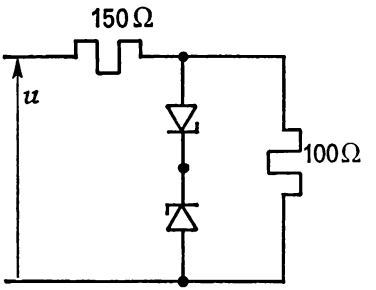


Fig. 142.

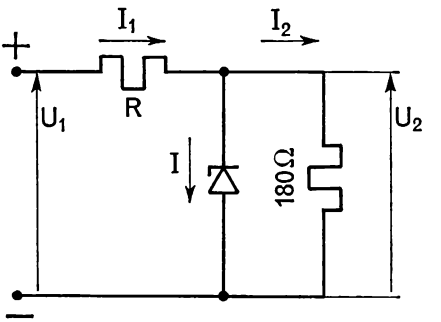


Fig. 143.

2° Calculer le courant dans chaque portion de circuit quand *u* passe par les valeurs suivantes (V) : 10 — 12 — 24 — 36 — 48.

3° Quel courant maximal les diodes doivent-elles supporter?

9. 10. — Une diode Zener parfaite (chute de tension directe nulle) est utilisée pour stabiliser une tension continue U_1 variant de 40 à 60 V. La tension de Zener est 45 V (fig. 143).

1° Calculer R pour que le courant I_2 soit 200 mA quand $U_1 = 40$ V. Quelle est alors la tension U_2? La valeur de R est conservée pour la suite du problème.

2° Calculer les courants dans chaque portion de circuit quand $U_1 = 60$ V.

3° Pour quelle valeur minimale de U_1, la tension U_2 atteint-elle 45 V?

4° Tracer la courbe $U_2 = f(U_1)$. Donner les formules exprimant le courant total I_1, *a*) pour $U_2 < 45$ V; *b*) pour $U_2 = 45$ V.

5° A partir de quelle tension U_1 y a-t-il réellement stabilisation?

10

TUBE TRIODE

54. *Étude expérimentale.*

1° Description. — C'est un tube diode auquel une troisième électrode appelée **grille** a été ajoutée (fig. 144). Cette électrode est située entre l'anode et la cathode et beaucoup plus près de cette dernière (fig. 145).

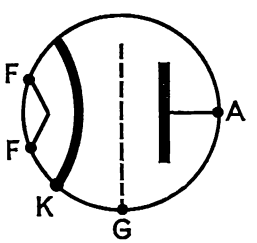


Fig. 144. — *Symbole d'un tube triode à chauffage indirect.*

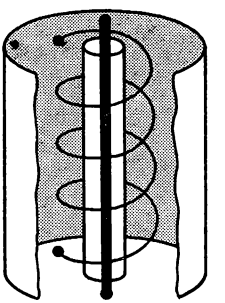


Fig. 145. — *Dispositions relatives du filament de la cathode, de la grille et de l'anode.*

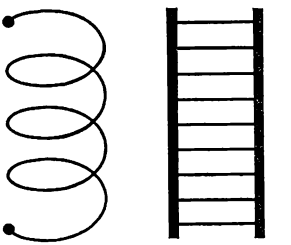


Fig. 146. — *Grille « spirale » et grille « échelle ».*

La grille peut avoir divers aspects (fig. 146), mais ce n'est jamais une électrode pleine.

2° Montage. — Outre le circuit de chauffage et le circuit anodique du tube diode, le tube triode comporte un circuit de grille. La source de grille est un potentiomètre alimenté par une batterie de quelques volts dont le plus est en général relié à la cathode (fig. 147). **La grille est donc négative par rapport à celle-ci.**

La tension de grille par rapport à la cathode est notée:

$$U_g = V_g - V_k$$

La tension d'anode est comme pour un tube diode (fig. 148) :

$$U_a = V_a - V_k$$

Si le potentiel de la cathode est choisi comme zéro (cathode à la masse) on a $V_k = 0$ et par suite :

$$U_g = V_g \quad \text{et} \quad U_a = V_a$$

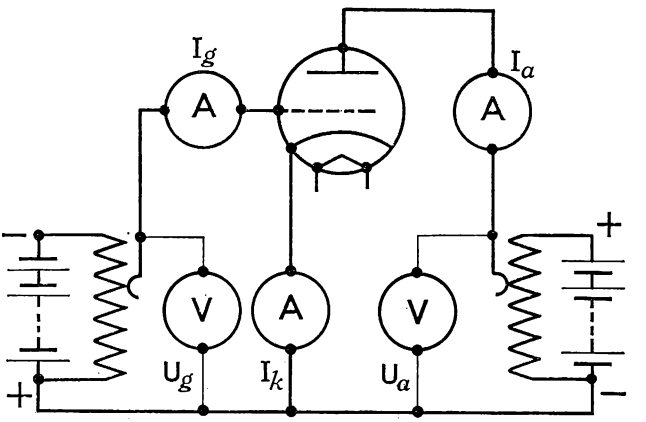


Fig. 147. — *Montage d'un tube triode pour le tracé des caractéristiques.*

3° **Rôle de l'anode.** — La tension de chauffage étant normale et, la tension grille U_g étant fixée à zéro, faisons varier U_a et relevons I_a, nous obtenons une courbe tout à fait comparable à la caractéristique statique d'un tube diode : **dans un tube triode la tension anodique a le même rôle que dans un tube diode** (fig. 149). Rappelons que la saturation ne peut être obtenue avec les tubes modernes.

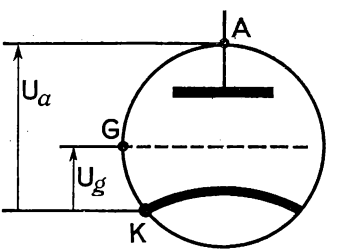


Fig. 148. — *Les tensions sont définies par rapport à la cathode.*

4° **Rôle de la grille.** — La tension anodique étant fixée à 100 V, le courant est $I_a = 8{,}4$ mA pour $U_g = 0$. Diminuons (1) U_g sans changer U_a : le courant diminue. Pour $U_g = -2$ V, $I_a = 4{,}3$ mA et pour $U_g = -4$ V, $I_a = 1{,}2$ mA. Enfin pour $U_g = -6$ V, le courant s'annule totalement (fig. 150).

(1) U_g passant de 0 à -2 V, il s'agit bien d'une diminution.

Le courant anodique peut donc être commandé par la tension grille. Chaque volt de grille a même davantage d'influence qu'un volt d'anode : une tension grille de — 6 V annule les effets d'une tension anodique de 100 V.

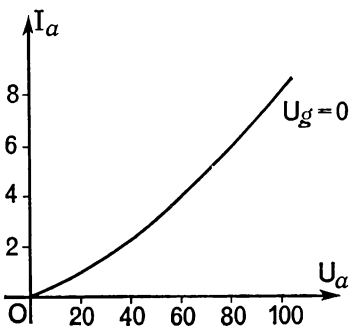


Fig. 149. — *Influence de l'anode.*

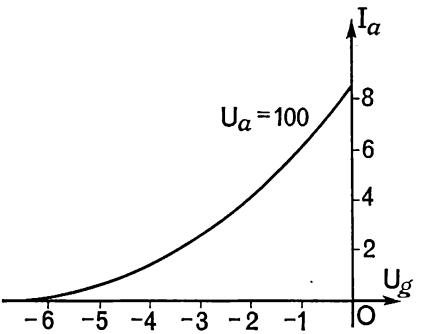


Fig. 150. — *Influence de la grille.*

Pendant toutes ces mesures l'ampèremètre qui mesure I_k indique la même valeur que celui qui mesure I_a tandis que celui qui mesure I_g ne dévie pas : tant que la grille est négative le courant grille reste nul ; tous les électrons émis par la cathode vont à l'anode :

$$U_g \leqslant 0 \Rightarrow I_a = I_k \quad \text{et} \quad I_g = 0$$

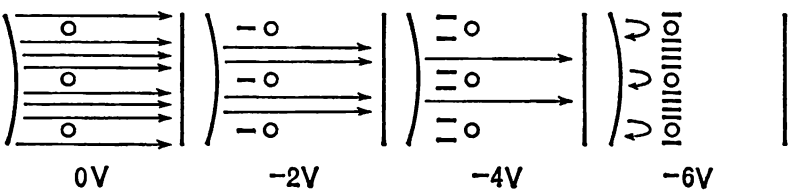


Fig. 151. — *Interprétation électronique. Le barrage créé par la grille est d'autant plus important que Ug est plus négatif.*

55. *Interprétation électronique.*

1° Les électrons émis par la cathode sont attirés par l'anode comme dans un tube diode tant que $U_g = 0$. Quand U_g est négatif les électrons, négatifs aussi, ont à franchir un barrage ou barrière de potentiel, ceux qui réussissent à passer sont d'autant moins nombreux que U_g est plus

négatif. Quand U_g atteint la valeur de — 6 V, tous les électrons sont repoussés et aucun d'eux ne peut atteindre l'anode (fig. 151). La grille étant beaucoup plus près de la cathode que n'en est l'anode, on s'explique facilement que ses volts aient davantage d'influence.

2° **Grille positive.** *a*) Inversons les polarités de la source donnant la tension grille et rendons U_g de plus en plus positive (U_a = Cte) : le courant anodique augmente d'abord puis diminue tandis qu'un courant grille apparaît (fig. 152).

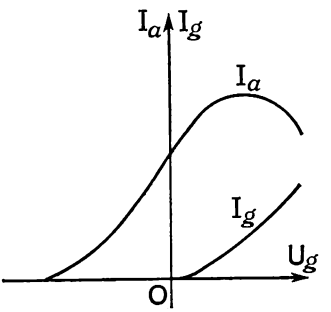


Fig. 152. — *Fonctionnement avec grille positive.*

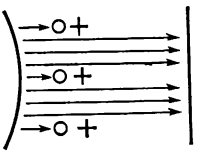


Fig. 153.

b) *Interprétation.* — L'extraction des électrons de la charge d'espace est facilitée par la présence d'une grille positive mais quand U_g augmente celle-ci capte de plus en plus d'électrons (fig. 153). Si l'on pouvait, sans détruire le tube, porter U_g à + 50 V par exemple, le courant anodique pourrait s'annuler (voir chap. 15, § 94).

On peut vérifier au cours de l'expérience que $I_k = I_a + I_g$.

56. *Réseau Kellog.*

1° **Définitions.** — *a*) Lorsqu'une grandeur dépend de deux variables, il est impossible de représenter dans un plan ses variations simultanées en fonction de ces deux variables.

b) On obtient un **réseau de courbes** en représentant les variations de la fonction par rapport à l'une des variables, l'autre étant prise comme paramètre.

c) Le courant anodique étant fonction de la tension anodique et de la tension grille $I_a = f(U_a, U_g)$, on obtiendra une représentation de ses variations à l'aide de deux réseaux :

— **Le réseau Kellog** où $I_a = f(U_a)$ pour différentes valeurs de U_g.

— **Le réseau mutuel** où $I_a = f(U_g)$ pour différentes valeurs de U_a.

d) Le réseau Kellog est donc l'ensemble des caractéristiques « courant anodique-tension anodique », chacune d'elles étant tracée pour une valeur donnée de U_g.

2° **Tracé du réseau.** — Le montage de la figure 147 est utilisé. On peut y supprimer les ampèremètres donnant I_k et I_g. On choisit une valeur pour U_g, on fait varier U_a et on relève les valeurs correspondantes de I_a. La figure 154 est un réseau relevé avec un tube 6C5. Le tableau ci-dessous correspond à la courbe $U_g = -2$ V.

U_a (V) . . .	0	20	40	60	80	100	120	140
I_a (mA) . .	0	0	0,4	1,4	2,8	4,3	6,1	8

3° **Limites d'utilisation.** — Ce sont les mêmes que pour un tube diode : courant maximal I_{am} pouvant être fourni par la cathode, tension inverse maximale U_{im} et puissance maximale P_{am} pouvant être dissipée par l'anode. Elles se placent sur le réseau Kellog de la même façon que pour un tube diode. Pour le tube 6C5, $P_{am} = 2$ W.

57. *Résistance interne.*

1° **Définition.** — Pour une tension grille donnée, la résistance interne du tube est le quotient $R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}$ d'une petite variation de tension anodique par la variation de courant anodique qu'elle produit.

$$\textbf{(16)} \qquad \boxed{R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}} \qquad \textbf{pour } U_g = \text{Cte}$$

2° **Détermination.** — Elle est effectuée sur le réseau comme pour un tube diode. On peut d'ailleurs utiliser les valeurs du tableau précédent (deux dernières colonnes) pour $U_g = -2$ V.

de 120 à 140, $\Delta U_a = 20$ V

de 6,1 à 8, $\Delta I_a = 1{,}9$ mA.

$$R_i = \frac{20}{1{,}9 \times 10^{-3}} = 10\,500\,\Omega.$$

REMARQUE. — A la résistance interne d'un tube triode ne correspond aucun effet joule.

3° La résistance interne varie avec la caractéristique retenue et, sur cette caractéristique, avec le point choisi.

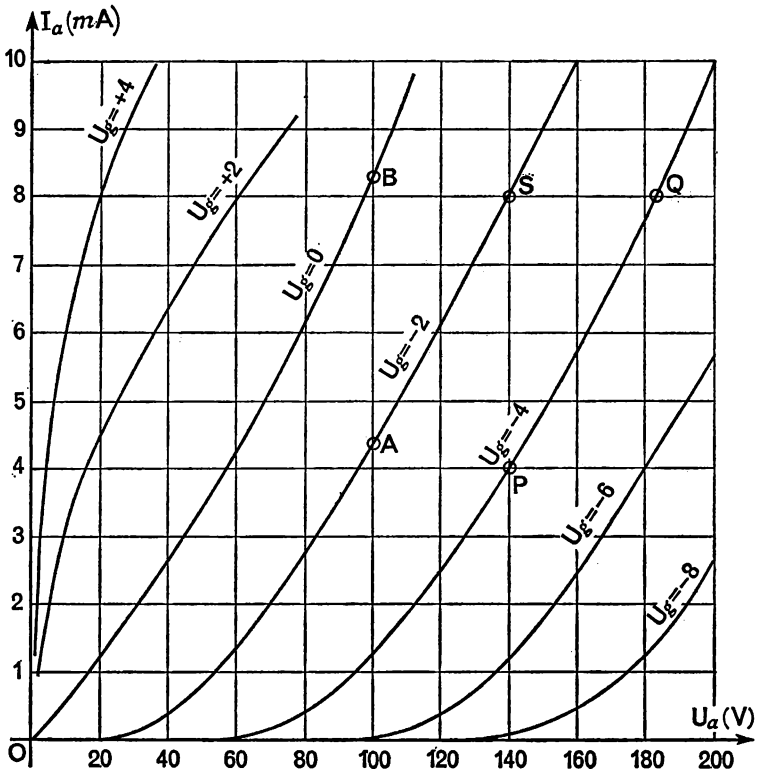


Fig. 154. — *Réseau Kellog du tube 6C5.*

Cependant on constate que sur une bonne partie du réseau les caractéristiques sont sensiblement :

— rectilignes ;

— parallèles ;

— équidistantes pour des valeurs de U_g régulièrement espacées (0, — 2, — 4...).

Cette partie du réseau est appelée **domaine linéaire.**

Dans ce domaine la résistance interne varie peu et les caractéristiques peuvent se déduire l'une de l'autre par translation.

58. *Facteur d'amplification.*

1° Le courant étant initialement fixé à 4 mA pour $U_g = -4$ V et $U_a = 140$ V (point P) proposons-nous de le porter à 8 mA. Nous pouvons au choix agir séparément sur U_g ou sur U_a ou au contraire sur les deux tensions (fig. 154) :

a) Conservons $U_a = 140$ V, il faut porter U_g à -2 V pour avoir 8 mA (point S).

b) Conservons $U_g = -4$ V, il faut porter U_a à 184 V pour avoir 8 mA (point Q).

Ainsi les deux variations $\Delta U_a = 184 - 140 = 44$ V et $\Delta U_g = -2 - (-4) = +2$ V produisent séparément la même variation de courant : leur rapport $\mu = \dfrac{\Delta U_a}{\Delta U_g}$ est appelé coefficient d'amplification du tube.

$$\textbf{(17)} \qquad \boxed{\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_g}} \qquad \textbf{pour un même } \Delta I_a$$

2° Définition. — **Le facteur d'amplification d'un tube triode est le rapport de la variation de tension anodique à la variation de tension grille qui produit la même variation de courant.**

Calculons μ avec les valeurs ci-dessus :

$$\mu = \frac{44}{2} = 22.$$

Remarque. — Quotient de deux tensions, μ est un nombre abstrait.

3° **Autre définition.** — Pour un courant anodique donné le facteur d'amplification est la valeur absolue du rapport d'une petite variation ΔU_a de la tension anodique à la petite variation ΔU_g correspondante de la tension grille :

$$\textbf{(17 \textit{bis})} \qquad \boxed{\mu = \left|\frac{\Delta U_a}{\Delta U_g}\right|} \qquad \textbf{(pour } I_a = \text{Cte)}$$

EXEMPLE. — Pour passer à courant constant du point S (— 2 ; 140) au point Q (— 4 ; 184) il faut produire simultanément :

$$\Delta U_g = -2 \text{ V} \quad \text{et} \quad \Delta U_a = 44 \text{ V}$$

$$\mu = \left| \frac{44}{-2} \right| = 22$$

59. *Réseau mutuel.*

1° **Définitions.** — *a*) Un réseau de tube est appelé mutuel quand les courbes qui le constituent traduisent les variations de courant d'une électrode en fonction de la tension d'une autre électrode.

b) Pour un tube triode, le réseau mutuel est formé par les courbes $I_a = f(U_g)$ donnant les variations du courant anodique en fonction de la tension grille, la tension anodique étant prise comme paramètre.

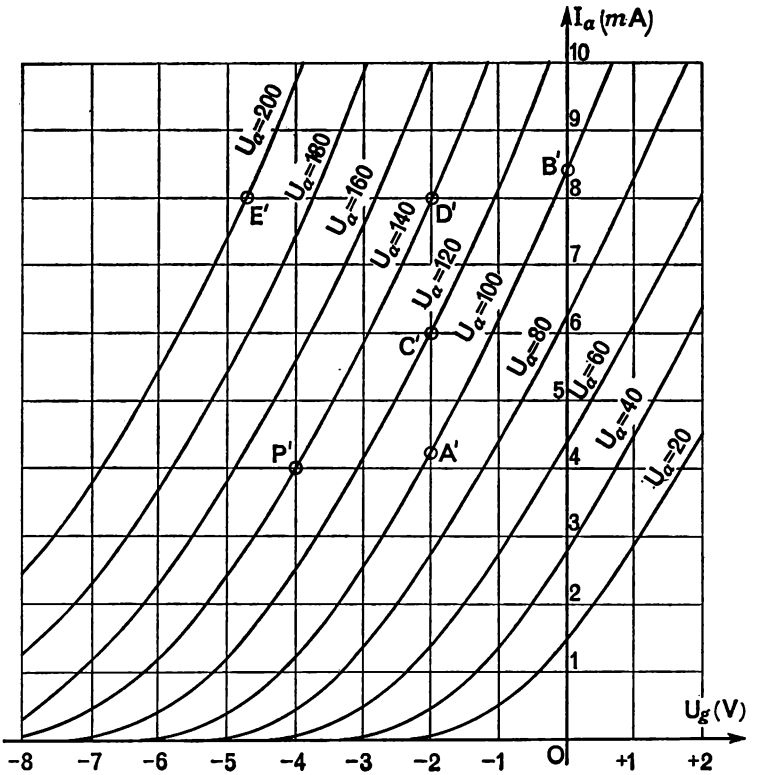


Fig. 155. — *Réseau mutuel du tube 6C5.*

2° **Tracé du réseau.** — On utilise toujours le montage de la figure 147. Une valeur de U_a étant choisie on fait varier U_g et on relève le courant I_a correspondant. La figure 155 est un réseau relevé avec un tube 6C5. Le tableau ci-dessous correspond à $U_a = 100$ V.

U_g (V)	—7	—6,5	—6	—5	—4	—3	—2	—1	0
I_a (mA) . . .	0	ε	0,05	0,4	1,2	2,6	4,3	6,2	8,4

La tension grille pour laquelle le courant anodique s'annule est appelée **tension de cut-off** (1) ou tension de suppression U_{co}. A chaque tension anodique correspond une tension de cut-off. Dans le tableau, pour $U_a = 100$ V, $U_{co} \simeq -6$ V.

60. *Pente du tube.*

1° Définition. — **Pour une tension anodique donnée la pente du tube est le quotient $p = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g}$ d'une petite variation du courant anodique par la variation de tension grille qui l'a produite.**

$$\textbf{(18)} \qquad \boxed{p = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g}} \text{ pour } U_a = \text{Cte} \begin{cases} \Delta I_a & \text{en mA} \\ \Delta U_g & \text{en V} \\ p & \text{en mA/V.} \end{cases}$$

2° **Détermination.** — Elle est effectuée sur une courbe comme pour la résistance interne. On peut aussi utiliser les valeurs du tableau précédent. (Colonnes 7 et 9.)

de -2 à 0 $\quad \Delta U_g = 2$ V

de $4{,}3$ à $8{,}4$ $\quad \Delta I_a = 4{,}1$ mA

$$p = \frac{4{,}1}{2} = 2{,}05 \text{ mA/V.}$$

3° La pente d'un tube varie avec la caractéristique retenue et sur cette caractéristique avec le point choisi.

(1) To cut-off (anglais) = couper = supprimer.

Cependant on constate sur le réseau l'existence d'un domaine linéaire où les caractéristiques sont sensiblement :

— rectilignes ;

— parallèles ;

— équidistantes pour des valeurs de U_a régulièrement espacées (100, 120, 140...).

Dans ce domaine la pente varie peu et les caractéristiques peuvent se déduire l'une de l'autre par translation.

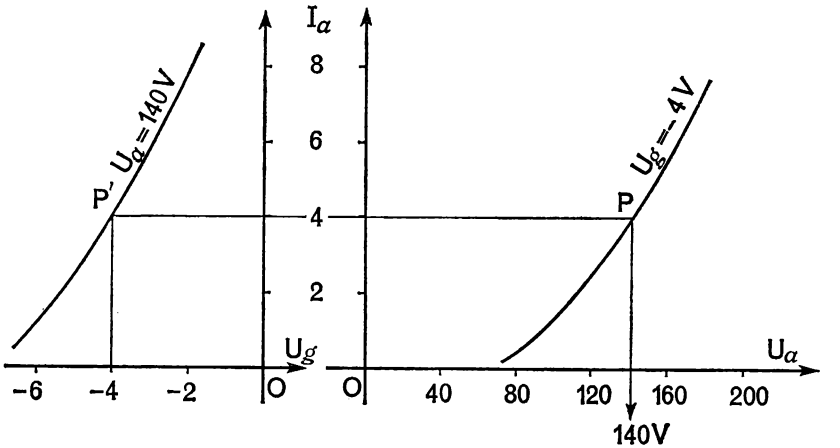


Fig. 156. — *Les points P et P' représentent chacun dans leur réseau le même état du tube.*

61. *Interdépendance des deux réseaux.*

1° Correspondance entre les deux réseaux. — La connaissance du réseau Kellog permet de construire le réseau mutuel et inversement. Par exemple, le point P du réseau Kellog a pour coordonnées 140 V et 4 mA en outre il se trouve sur la caractéristique $U_g = -4$ V. Le point P' correspondant du réseau mutuel a pour coordonnées — 4 V et 4 mA et se trouve sur la caractéristique $U_a = 140$ V (fig.154 et 155). Pour plus de clarté les constructions sont effectuées sur la figure 156.

2° La pente peut se déterminer sur le réseau Kellog. — A la verticale de $U_a = 100$ V on retrouve $I_a = 4{,}3$ mA pour $U_g = -2$ V (point A, fig. 154) et $I_a = 8{,}4$ mA pour $U_g = 0$ (point B) soit $p = \frac{8{,}4-4{,}3}{2} = 2{,}05$.

3° **La résistance interne peut se déterminer sur le réseau mutuel.** — A la verticale de $U_g = -2$ V on retrouve $I_a = 6{,}1$ mA pour $U_a = 120$ V (point C′, fig. 155) et $I_a = 8$ mA pour $U_a = 140$ V (point D′) : $R_i = \dfrac{140 - 120}{8 - 6{,}1} = 10{,}5$ kΩ.

4° **Le facteur d'amplification peut aussi se déterminer sur le réseau mutuel.** — A l'horizontale de 8 mA on trouve $U_a = 140$ V pour $U_g = -2$ V (point D′) et $U_a = 200$ V pour $U_g = -4{,}7$ V (point E′) :

$$\mu = \frac{200 - 140}{4{,}7 - 2} = \frac{60}{2{,}7} \simeq 22.$$

62. *Paramètres d'un tube.*

1° La résistance interne R_i, le coefficient d'amplification μ et la pente p sont les trois **paramètre** d'un tube. Ils ne sont pas indépendants.

2° Soient ΔU_g (à $U_a = \text{Cte}$) et ΔU_a (à $U_g = \text{Cte}$) les deux variations de tension qui produisent la même variation ΔI_a de courant, nous avons simultanément :

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}, \quad p = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g} \quad \text{et} \quad \mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_g}$$

et nous pouvons écrire $\dfrac{\Delta U_a}{\Delta U_g} = \dfrac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \times \dfrac{\Delta I_a}{\Delta U_g}$ soit

$$\textbf{(19)} \qquad \boxed{\mu = pR_i} \begin{cases} p \text{ en A/V} \\ R_i \text{ en } \Omega \end{cases} \quad \text{ou} \quad \begin{cases} p \text{ en mA/V} \\ R_i \text{ en k}\Omega \end{cases}$$

Attention aux unités, si l'on conserve p en mA/V, R_i doit être exprimée en kΩ.

Rappelons les valeurs précédemment trouvées : $p = 2{,}05$ mA/V, $R_i = 10\,500\ \Omega$ et $\mu = 22$ on a sensiblement :

$$2{,}05 \times 10^{-3} \times 10\,500 = 21{,}5 \simeq 22$$

Pour retrouver exactement μ il faudrait prendre des variations très petites et effectuer des lectures très précises, ce qui est difficilement compatible.

3° **Variations des paramètres.** — Leurs valeurs dépendent des points choisis pour leur détermination, quand I_a augmente :

— R_i diminue ;

— p augmente ;

— $\mu = p \times R_i$ varie peu (fig. 157).

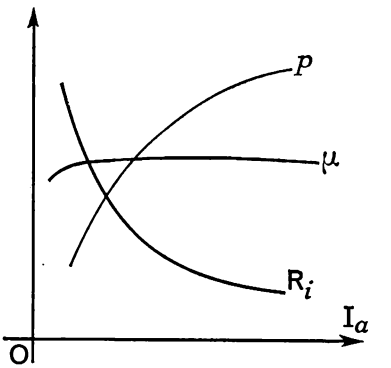


Fig. 157. — *Variations des paramètres.*

63. *Équation caractéristique du tube triode.*

1° **Question posée.** — Comment le courant anodique varie-t-il pour des variations simultanées de la tension grille et de la tension anodique ?

2° **Superposition d'états linéaires.** — Lorsqu'une grandeur z est séparément une fonction sensiblement linéaire de deux variables x et y, deux variations simultanées Δx et Δy de celles-ci produisent la même variation de z que si elles s'effectuaient successivement.

3° Soient $\Delta I_{a1} = \dfrac{\Delta U_a}{R_i}$ la variation due à la tension anodique et $\Delta I_{a_2} = p\,\Delta U_g$ la variation due à la tension grille, la variation totale ΔI_a sera :

$$\Delta I_a = \Delta I_{a1} + \Delta I_{a_2} = \frac{\Delta U_a}{R_i} + p\,\Delta U_g = \frac{\Delta U_a + pR_i\,\Delta U_a}{R_i}$$

soit puisque $pR_i = \mu$.

$$\textbf{(20)} \qquad \boxed{\Delta I_a = \frac{\Delta U_a + \mu\,\Delta U_g}{R_i}}$$

Cette relation est l'équation caractéristique du tube triode, elle est applicable dans le domaine linéaire. Cette relation est algébrique, ΔU_a, ΔU_g et ΔI_a pouvant être négatifs.

Si l'on veut trouver ΔI_a en mA, il faut exprimer R_i en kΩ.

64. *Réseau idéalisé.*

Lorsque les caractéristiques d'un tube sont suffisamment rectilignes, il est possible de les remplacer par des droites. Les deux réseaux sont alors formés de droites parallèles et équidistantes pour des valeurs régulièrement espacées de la tension choisie comme paramètre (U_g ou U_a). Les trois paramètres du tube sont alors constants et l'équation caractéristique est applicable sur l'ensemble des réseaux. Les caractéristiques peuvent se mettre en équation et les réseaux sont mathématiquement définis par la connaissance de deux des trois paramètres (voir problème rédigé **10. 11** et fig. **158**).

EXERCICES

NOTE. — Le tableau ci-dessous est à utiliser pour les exercices **10. 01** à **10. 10**. Il est nécessaire de commencer par le tracé des réseaux **10.01** et **10.02**.

Tableau de caractéristiques du tube triode 12AT7

U_g \ U_a	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240
+ 1 . . .	5,50	7,50	9,10									
+ 0,5 . . .	2,50	4,40	6	7,60	9,10							
0 . . .	1,10	2,3	3,55	4,90	6,40	8	9,50					
— 0,5 . . .	0,20	0,70	1,55	2,60	3,80	5,10	6,50	8	9,50			
— 1 . . .	0	0,15	0,50	1,10	2	3,10	4,25	5,50	7	8,50	10	
— 1,5 . . .		0	0,10	0,40	0,85	1,50	2,40	3,45	4,70	6	7,50	9
— 2 . . .			0	0,10	0,30	0,70	1,30	2	3	4,10	5,40	6,70
— 3 . . .					0	0,10	0,20	0,50	1	1,65	2,50	3,75

10. 01. — Construire le réseau Kellog.

10. 02. — Construire le réseau mutuel.

10. 03. — Déterminer la résistance interne du tube en différents points de la caractéristique $U_g = -1$ V. Tracer la courbe $R_i = f(I_a)$. [pour $I_a = 7$ mA on trouve $R_i \simeq 13\,300\ \Omega$].

10. 04. — Déterminer la pente du tube en différents points de la caractéristique $U_a = 180$ V et tracer la courbe $p = f(I_a)$ [pour $U_g = -1$ V on trouve $p = 4{,}8$ mA/V].

10. 05. — Déterminer sur le réseau Kellog le facteur d'amplification, moyen entre deux caractéristiques pour $I_a = 5$ mA [entre $-0{,}5$ V et -1 V, $\mu = 66$].

10. 06. — Déterminer sur le réseau mutuel le facteur d'amplification moyen entre deux caractéristiques pour $I_a = 7{,}5$ mA [entre 160 V et 180 V, $\mu = 66$].

10. 07. — A l'aide du réseau mutuel construire la caractéristique du réseau Kellog correspondant à $U_g = -2{,}5$ V.

10. 08. — A l'aide du réseau Kellog construire la caractéristique du réseau mutuel correspondant à $U_a = 150$ V.

10. 09. — En prenant $p = 5{,}5$ mA/V et $R_i = 12\ k\Omega$, calculer μ et écrire l'équation caractéristique du tube [66 et $\dfrac{\Delta U_a + 66\,\Delta U_g}{12}$].

10. 10. — Soit P le point de coordonnées $U_g = -0{,}5$ V, $U_a = 140$ V, $I_a = 6{,}5$ mA. En appliquant l'équation caractéristique avec les valeurs du **10.** 09 trouver le courant pour $U_g = -1$ V et $U_a = 160$ V. Comparer le résultat trouvé à la valeur du tableau (p. 140) [5,42 mA].

PROBLÈMES

I. AVEC SOLUTION.

10. 11. — Un tube triode dont la résistance interne est $R_i = 10\ k\Omega$ et la pente $p = 2{,}5$ mA/V a des caractéristiques parfaitement linéaires (réseau idéalisé).

1° Calculer μ et écrire l'équation caractéristique du tube.

2° Construire le réseau Kellog pour les valeurs suivantes de U_g : 0, — 2, — 4, — 6, — 8.

3° Construire le réseau mutuel pour les valeurs suivantes de U_a : 50, 100, 150, 200, 250.

4° Placer sur le réseau Kellog l'hyperbole de dissipation maximale $P_{am} = 2$ W.

— SOLUTION —

1° $\mu = pR_i = 2{,}5 \times 10 = 25.$

$$\Delta I_a = \frac{\Delta U_a + 25\,\Delta U_g}{10} \quad (R_i \text{ en } k\Omega \Rightarrow \Delta I_a \text{ en mA})$$

Cette formule s'applique ici, même pour des grandes variations.

2° Construction du réseau Kellog (fig. 158) :

a) La caractéristique $U_g = 0$ passe par O.

Cherchons un deuxième point en faisant $\Delta U_a = 100$, l'équation caractéristique donne :

$$\Delta I_a = \frac{100}{10} = 10 \text{ mA (point A).}$$

La caractéristique $U_g = 0$ est la droite OA.

b) A courant constant, 0 mA par exemple, pour $\Delta U_g = -2$ V on a $\Delta U_a = \mu \mid \Delta U_g \mid = 50$.

La caractéristique $U_g = -2$ passe par B (50 V, 0 mA) et est parallèle à la première droite. Les autres caractéristiques se déduisent par translation.

3° Construction du réseau mutuel :

Pour obtenir une caractéristique il suffit d'en connaître deux points. Par exemple pour $U_a = 150$ V, on reporte dans le réseau mutuel (en C′ et D′) les points C et D du réseau Kellog :

C (150 V. — 6 V. 0 mA) et D (150 V . 0 V . 15 mA).

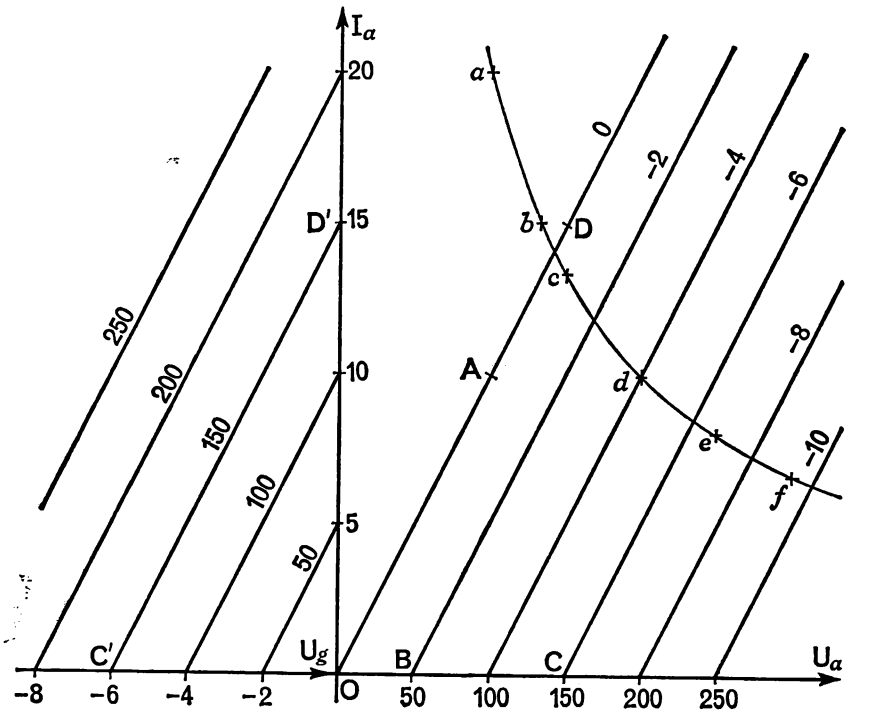


Fig. 158.

4° Hyperbole de dissipation maximale :

Calculons I_a pour quelques valeurs de U_a et portons les points dans le réseau :

$$I_a = \frac{2}{U_a} \text{ (en A)} = \frac{2\,000}{U_a} \text{ (en mA).}$$

U_a	100	133	150	200	250	300
I_a	20	15	13,3	10	8	6,7
Points	*a*	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*

II. A RÉSOUDRE.

10. 12. — Tracer les réseaux idéalisés de tubes triodes, écrire l'équation caractéristique et placer l'hyperbole de dissipation maximale. Les valeurs ΔU_g et ΔU_a données dans le tableau seront retenues pour l'échelonnement des droites.

Ce problème peut être résolu avec l'un des jeux de valeurs suivants.

p (mA/V)	R_t (kΩ)	P_{am} (W)	ΔU_g	ΔU_a
8	5	4	1	40
2	15	1	2	50
5	12	5	2	60
6	20	3	1	60

11

FONCTIONNEMENT EN AMPLIFICATEUR DU TUBE TRIODE

65. *Droite de charge.*

1° **Montage.** — Une résistance de charge R_a (fig. 159) est en série dans le circuit anodique. La source d'anode n'est plus représentée. La tension anodique, différente de la tension U_b de la source « haute tension », doit être mesurée.

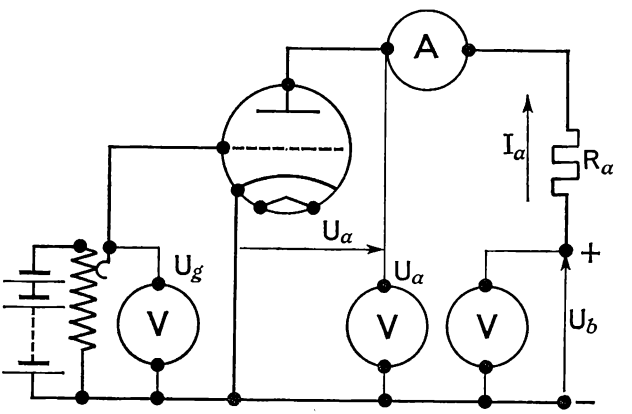


Fig. 159. — *Tube triode avec résistance de charge.*

2° **Équation.** — *a*) La loi d'Ohm appliquée au circuit anodique donne, comme pour un tube diode:

$$\textbf{(15)} \qquad \boxed{U_b = U_a + R_a I_a}$$

N'oublions pas que U_a et I_a dépendent aussi de la tension grille bien que celle-ci ne figure pas dans la formule.

b) Dans le réseau Kellog, U_a est la variable et I_a la fonction ; pour une tension U_b et une charge R_a données, donc constantes, la relation (15) peut s'écrire $R_a I_a = U_b - U_a$ soit :

$$\textbf{(21)} \qquad \boxed{I_a = -\frac{U_a}{R_a} + \frac{U_b}{R_a}} \qquad \begin{cases} U_a \text{ et } U_b \text{ en volts} \\ R_a \text{ en } k\Omega \\ I_a \text{ en mA} \end{cases}$$

Le courant est une fonction linéaire décroissante de la tension anodique.

L'équation 21 est celle d'une droite dite de charge (fig. 160).

— La pente [1] de la droite est $-\frac{1}{R_a}$.

— Le point A d'intersection avec l'axe OU_a ($I_a = 0$) a pour abscisse $U_a = U_b$.

— Le point B d'intersection avec l'axe OI_a ($U_a = 0$) a pour ordonnée $I_a = \frac{U_b}{R_a}$.

3° Tracé de la droite de charge. — Pour tracer expérimentalement la droite, on fait varier U_g. Les variations de U_g modifient courant et par suite la tension anodique.

Reprenons le réseau du tube 6C5, choisissons $U_b = 200$ V et $R_a = 20\ k\Omega$. L'équation 21 s'écrit $I_a = -\frac{U_a}{20} + \frac{200}{20} = -\frac{U_a}{20} + 10$.

Traçons cette droite dans le réseau (fig. 160) : elle coupe OU_a à 200 V et OI_a à 10 mA. Avec le montage de la figure 159 proposons nous de retrouver quelques points de la droite. Nous relevons :

U_g .	−8	−6	−4	−2	0	+2	+4
U_a .	175	153	130	105	75	52	25
I_a .	1,1	2,1	3,2	4,7	6	7,3	8,6

Tous ces points reportés sur le réseau se retrouvent bien à très peu près sur la droite (petits cercles sur la fig. 160).

(1) Voir page 102.

4° **Courbe de charge du réseau mutuel.** — En y reportant les points du réseau Kellog, on obtient une courbe de charge assez différente d'une droite (fig. 161).

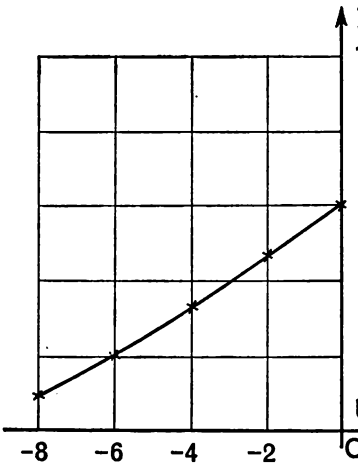


Fig. 161. — *Courbe de charge du réseau mutuel.*

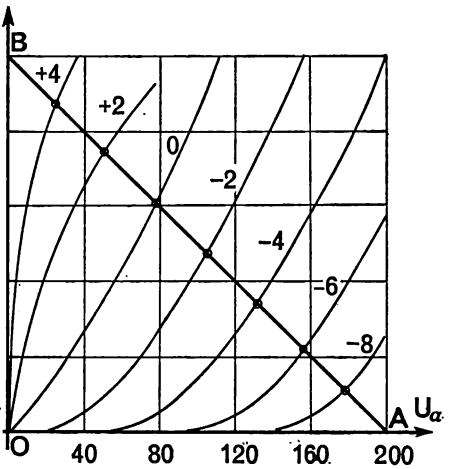


Fig. 160. *Droite de charge.*

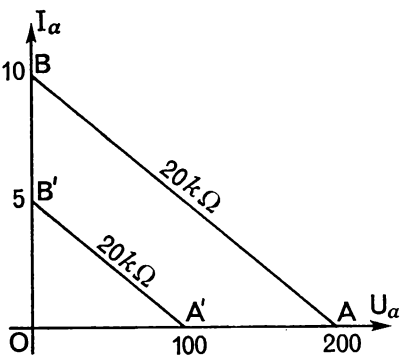


Fig. 162. — *Quand U_b varie la pente reste égale à $-\frac{1}{R_a}$.*

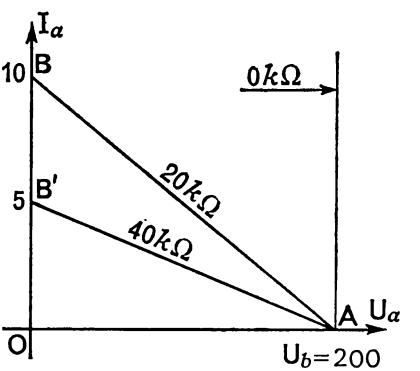


Fig. 163. — *Quand R_a varie, la droite pivote autour de $U_b = 200$.*

5° **Déplacement de la droite de charge.**

a) *Avec U_b :* si U_b est divisée par 2, l'ordonnée $\frac{U_b}{R_a}$ du point B d'intersection avec OI_a est aussi divisée par 2 ; la droite de charge a la même pente $-\frac{1}{R_a}$ et se déplace parallèlement à elle-même (fig. 162).

b) Avec R_a : si R_a double, l'ordonnée $\frac{U_b}{R_a}$ de B est divisée par 2, la droite de charge pivote autour du point A d'abscisse U_b (fig. 163). Pour $R_a = 0$, la droite de charge est verticale, on a $U_b = U_a$ quel que soit I_a.

66. *Amplification d'une variation de tension grille.*

1° **Point de repos.** — La tension U_b et la résistance R_a étant fixées, le point P de repos représentant l'état du tube se trouve sur la droite de charge ; si l'on choisit en outre une valeur U_{go} pour la tension grille, P se trouve également sur la caractéristique statique correspondante : **il est donc à l'intersection de cette dernière et de la droite de charge.**

Exemple sur le réseau du tube 6C5 (fig. 164) : pour $U_b = 200$ V et $R_a = 20$ kΩ choisissons $U_{go} = -2$ V, le point P de repos a pour coordonnées [1] :

$$U_{ao} = 105 \text{ V} \quad \text{et} \quad I_{ao} = 4{,}75 \text{ mA}$$

Notons que d'après la formule 15 : $R_a I_{ao} = U_b - U_{ao} = 95$ V, on retrouve cette valeur en multipliant R_a par I_{ao} : $20 \times 4{,}75 = 95$ V. Les deux tensions U_{ao} et RI_{ao} sont mises en évidence sur la figure.

2° **Variations de U_g.** — A partir du point de repos P ($U_{go} = -2$ V) faisons varier U_g de $\pm$ 2 V en déplaçant le curseur du rhéostat de grille. La tension grille varie donc entre — 4 V et 0 et le point de fonctionnement se déplace sur la droite de charge de part et d'autre de P entre Q et S. Relevons les coordonnées de ces deux points (fig. 164) :

Q (132 V ; 3,4 mA) S (78 V ; 6,1 mA).

De Q à S nous obtiendrons les variations suivantes :
pour U_g : $0 - (-4) = 4$ V ; pour I_a : $6{,}1 - 3{,}4 = 2{,}7$ mA ;
pour U_a : $78 - 132 = -54$ V.

Nous constatons que : *a*) Les 4 V de variation de tension grille produisent 54 V de variation de tension anodique.

→ **La variation de la tension grille se retrouve amplifiée entre les bornes du tube.**

(1) Nous affectons de l'indice zéro les coordonnées du point de repos.

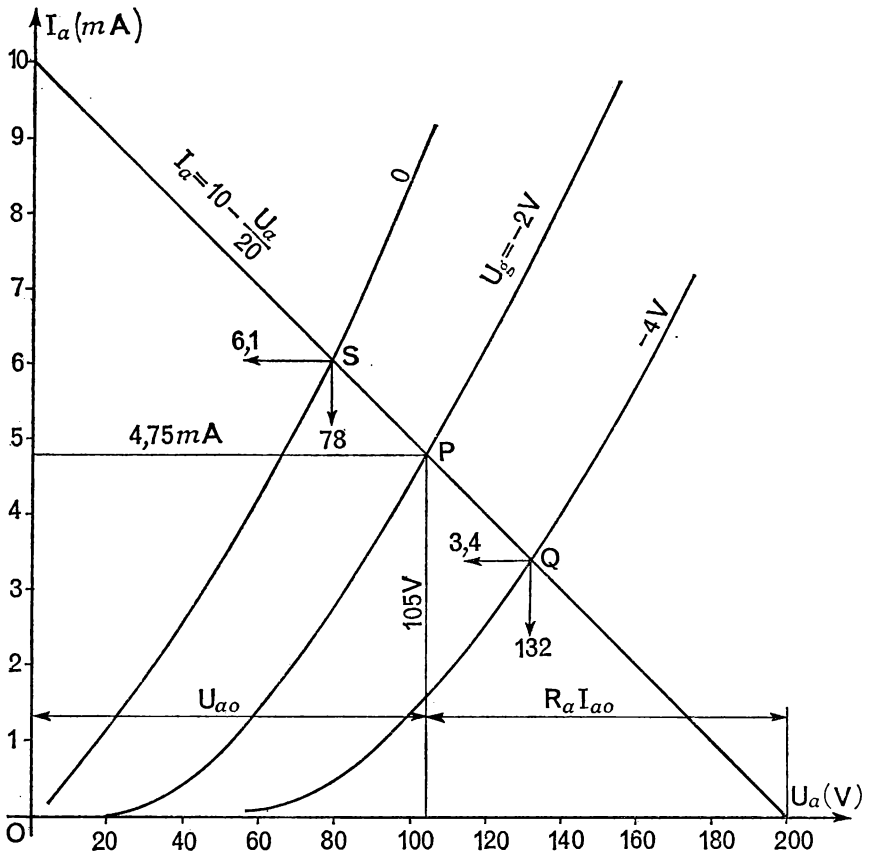


Fig. 164.

b) Quand U_g augmente, I_a augmente et U_a diminue.

→ **Une augmentation de la tension grille provoque une augmentation du courant anodique et une diminution de la tension anodique.**

67. *Formules des petites variations.*

1° Variations de courant. — Une variation ΔU_g de tension grille produit simultanément une variation ΔI_a de courant et une variation ΔU_a de tension anodique, proposons-nous de trouver les relations liant ces trois termes.

Une première relation nous est donnée par l'équation caractéristique (20) :

$$\Delta I_a = \frac{\Delta U_a + \mu \Delta U_g}{R_i}$$

D'autre part, le point de fonctionnement ne quittant pas la droite de charge, on a toujours : $I_a = -\frac{U_a}{R_a} + \frac{U_b}{R_a}$ et puisque U_b et R_a sont constants nous avons : $\Delta I_a = -\frac{\Delta U_a}{R_a}$ soit $\Delta U_a = -R_a \Delta I_a$.

Reportons cette relation dans (20) :

$$\Delta I_a = \frac{-R_a \Delta I_a + \mu \Delta U_g}{R_i} \Rightarrow R_i \Delta I_a = -R_a \Delta I_a + \mu \Delta U_g \Rightarrow$$

$$R_i \Delta I_a + R_a \Delta I_a = \mu \Delta U_g \text{ d'où}$$

$$\textbf{(22)} \qquad \boxed{\Delta I_a = \frac{\mu \Delta U_g}{R_i + R_a}}$$

Remarques. — I. Cette formule contient la résistance interne R_i, elle n'est donc applicable que pour des variations limitées à un domaine où R_i peut être considérée comme constante.

II. Si les résistances sont en $k\Omega$, on retrouve directement ΔI_a en mA.

Exemple d'application. — Au § 66, nous avions $\Delta U_g = 4$ V et d'autre part $R_i \simeq 10\,500\ \Omega$, $R_a = 20\,000\ \Omega$ et $\mu \simeq 22$.

$$\Delta I_a = \frac{22 \times 4}{10{,}5 + 20} \simeq 2{,}88 \text{ mA}$$

Sur le réseau nous avions trouvé 2,7 mA, la différence est due aux variations de R_i (et peut être de μ).

2° **Variations de tension anodique.** — Reportons ΔI_a dans $\Delta U_a = -R_a \Delta I_a$ nous trouvons :

$$\textbf{(23)} \qquad \boxed{\Delta U_a = -\frac{\mu R_a \Delta U_g}{R_i + R_a}}$$

Remarques. — I. Applicable pour R_i sensiblement constante.

II. Les résistances peuvent s'exprimer indifféremment en Ω ou en

$k\ \Omega$ puisque la formule peut s'écrire en faisant apparaître un rapport de résistances, $\mu \Delta U_g \times \frac{R_a}{R_i + R_a}$.

Exemple d'application. — Avec les valeurs du 2° :

$$|\Delta U_a| = \frac{22 \times 20 \times 4}{10{,}5 + 20} \simeq 57{,}7 \text{ V}$$

Notons que de toute façon, avec les valeurs lues et avec les valeurs calculées on a bien toujours :

$$R_a = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{54}{2{,}7} = \frac{57{,}7}{2{,}88} = 20 \text{ k}\Omega$$

3° **Gain.** — Le gain d'un tube triode est le rapport de la variation de tension anodique à la variation de tension grille qui l'a produite.

$$A = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_g}$$

Calculons A avec la formule 23 :

$$\textbf{(24)} \qquad \boxed{A = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_g} = -\frac{\mu R_a}{R_i + R_a}} \quad \left\{ \begin{array}{l} R_i \text{ et } R_a \text{ exprimées} \\ \text{avec la même unité.} \end{array} \right.$$

Le signe moins vient du fait que ΔU_a et ΔU_g sont de signes contraires.

En écrivant $A = -\mu \frac{R_a}{R_i + R_a}$ on voit que $|A| < \mu$.

Exemple. — Nous avons trouvé $\Delta U_a = -54$ V pour $\Delta U_g = 4$ V, nous obtenons $A = -\frac{54}{4} = -13{,}5$.

Avec la formule $A = -22 \frac{20}{10{,}5 + 20} \simeq -14{,}4$.

4° **Pente dynamique.** — La pente dynamique ou en charge est le quotient $p' = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g}$ quand le tube comporte une résistance de charge. La formule 22 nous donne :

$$\textbf{(25)} \qquad \boxed{p' = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g} = \frac{\mu}{R_i + R_a}}$$

Cette pente est celle de la courbe de charge du réseau mutuel au voisinage du point de repos. Elle est inférieure à p :

$$p' = \frac{\mu}{R_i + R_a} < \frac{\mu}{R_i} = p$$

68. *Fonctionnement en amplificateur.*

1° Au lieu de faire varier U_g par action sur le rhéostat, plaçons en série avec la source continue de grille un générateur délivrant une tension sinusoïdale :

$$v = V_m \sin \omega t = V\sqrt{2} \sin \omega t \text{ (fig. 165)}$$

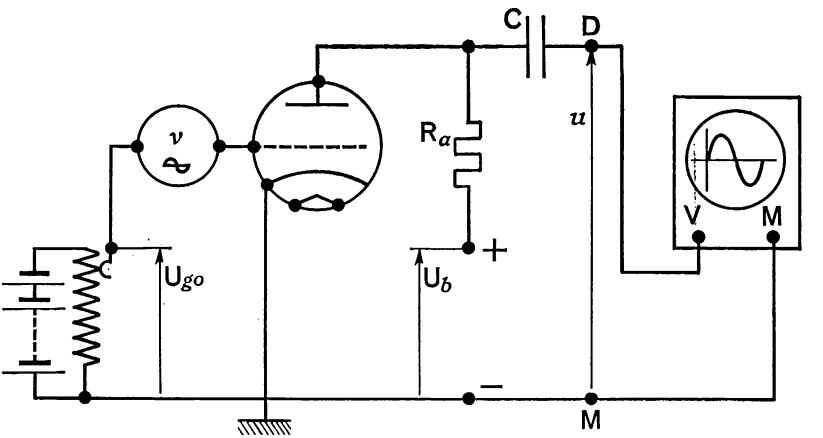


Fig. 165. — *La tension u de sortie est sinusoïdale.*

La tension v est le plus souvent appelée « **tension d'entrée** »; on dit aussi « tension affichée » ou « signal de grille ».

A un instant quelconque, par rapport à la valeur de repos U_{go} on peut écrire $\Delta U_g = v = V\sqrt{2} \sin \omega t$.

Les variations de tension grille étant sinusoïdales, dans la mesure où l'on peut admettre que p, R_i et μ sont constants, les formules 22 et 23 nous montrent que les variations ΔI_a et ΔU_a seront sinusoïdales aussi puisque proportionnelles à ΔU_g. Nous appellerons i et u ces variations.

Un oscillographe placé entre M et D (fig. 165) nous confirme la forme de u et par suite celle de i. Le condensateur de découplage C élimine

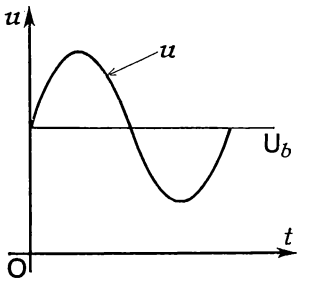


Fig. 166.

la tension continue U_b mais transmet intégralement les variations u. Sans lui, l'oscillographe [1] tracerait la sinusoïde autour d'un axe d'ordonnée U_b (fig. 166). La tension u est la **tension de sortie.**

2° Déplacement du point de fonctionnement. — Les valeurs instantanées des trois coordonnées U_g, I_a et U_a résultent de la superposition des grandeurs continues du point de repos et des grandeurs sinusoïdales dues à v. A chaque instant nous avons :

— pour la tension grille : $U_g = U_{go} + v$
— pour le courant anodique : $I_a = I_{ao} + i$
— pour la tension anodique : $U_a = U_{ao} + u$

Appelons V_m, I_m et U_m les valeurs maximales respectives de la tension d'entrée, du courant alternatif et de la tension de sortie. Le point de fonctionnement se déplace sur la droite de charge entre les limites suivantes :

— pour la tension grille : $U_{go} - V_m \leqslant U_g \leqslant U_{go} + V_m$
— pour le courant anodique : $I_{ao} - I_m \leqslant I_a \leqslant I_{ao} + I_m$
— pour la tension anodique : $U_{ao} - U_m \leqslant U_a \leqslant U_{ao} + U_m$

En particulier, si $V_m = 2$ volts, le tube se retrouve dans les conditions du § 66 et le point de fonctionnement « **excursionne** » entre les points Q et S déjà définis. Nous aurons alors :

$$I_m = \frac{2{,}7}{2} = 1{,}35 \text{ mA}$$

et $$U_m = \frac{54}{2} = 27 \text{ V}$$

Notons bien que de part et d'autre du point de repos, les ampli-

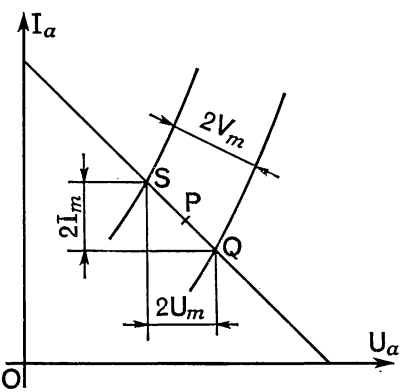


Fig. 167.

(1) Si l'oscillographe comporte une entrée dite continue (sans condensateur incorporé).

tudes de l'excursion sont V_m, I_m et U_m c'est-à-dire **la moitié des distances QS** (fig. 167).

La figure 168 fait apparaître les valeurs instantanées v, i et u. On voit que v et u sont en opposition. Contrairement aux apparences u est beaucoup plus grand que v car les échelles des tensions sont très différentes.

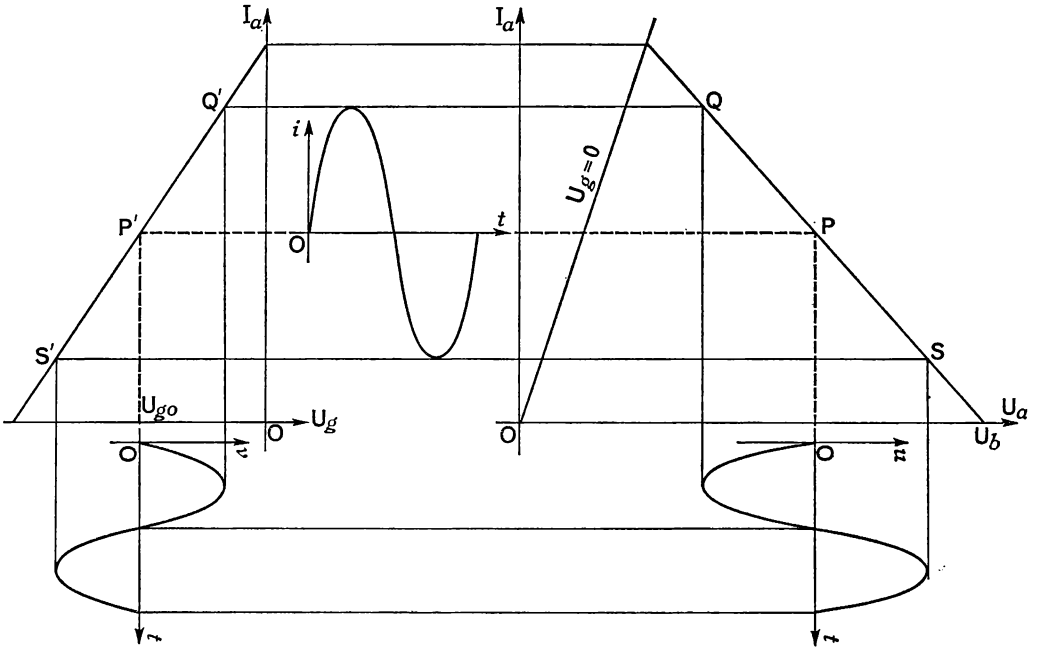


Fig. 168.

Quand v varie de 0 à V_m, le point de fonctionnement se déplace de P′ vers Q′ dans le réseau mutuel et de P vers Q dans le réseau Kellog. On voit que i varie alors de 0 à I_m et que u varie de 0 à $-U_m$. Pour simplifier, les caractéristiques et la courbe de charge du réseau mutuel ont été assimilées à des droites.

3° **Formules.** — Les formules établies pour les petites variations restent valables, elles s'appliquent uniquement aux variations, c'est-à-dire ici aux grandeurs sinusoïdales. Elles sont vraies à chaque instant pour les valeurs instantanées et le restent, en valeurs absolues, pour les valeurs efficaces ou maximales.

a) *Valeurs instantanées.*

— courant : $i = \dfrac{\mu V_m}{R_i + R_a} \sin\omega t$

— tension de sortie : $u = \dfrac{-\mu R_a V_m}{R_i + R_a} \sin\omega t$

b) *Valeurs maximales.*

$$I_m = \frac{\mu V_m}{R_i + R_a} \qquad \text{et} \qquad U_m = \frac{\mu R_a V_m}{R_i + R_a}$$

c) *Valeurs efficaces.*

— courant **(22 bis)** $\boxed{I = \dfrac{\mu V}{R_i + R_a}}$

— tension **(23 bis)** $\boxed{U = \dfrac{\mu R_a V}{R_i + R_a}}$

d) *Gain.*

(24 bis) $\boxed{A = \dfrac{u}{v} = -\dfrac{U}{V} = -\dfrac{\mu R_a}{R_i + R_a}}$

sa valeur absolue est $| A | = \dfrac{U_m}{V_m} = \dfrac{U}{V}$.

e) *Pente dynamique.*

(25 bis) $\boxed{p' = \dfrac{i}{v} = \dfrac{I}{V} = \dfrac{\mu}{R_i + R_a}}$

69. *Schéma équivalent.*

1° Les grandeurs continues U_{go} et U_b servent à placer le tube dans un état correspondant au point de repos mais n'interviennent pas (1) dans les calculs du fonctionnement en amplificateur. Il est donc possible

(1) Les valeurs I_{ao} et U_{ao} qui en résultent n'interviennent pas non plus.

de trouver pour celui-ci un schéma équivalent ne mettant en jeu que les grandeurs alternatives.

2° **Le tube triode est équivalent à un alternateur.** — La formule $I = \frac{\mu V}{R_i + R_a}$ nous invite à considérer le tube comme un alternateur de force électromotrice efficace $E = \mu V$ débitant sur sa résistance interne R_i en série avec la charge R_a (fig. 169).

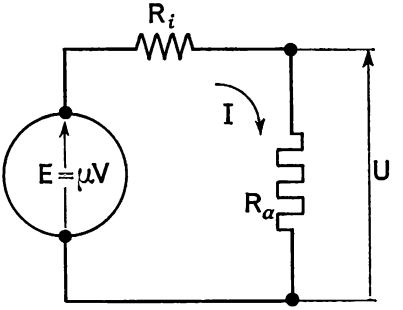


Fig. 169. — *Schéma équivalent à un tube triode.*

Nous mettons deux symboles distincts pour le seul tube : le générateur parfait et la résistance interne (1ère TI.F1). Ce schéma contient les formules 22 à 25 et dispense de les retenir. En effet on retrouve immédiatement pour les valeurs efficaces :

$$I = \frac{\mu V}{R_i + R_a} \quad \text{et} \quad U = R_a I$$

Le gain et la pente dynamique se calculent par les formules :

$$|A| = \frac{U}{V} \quad \text{et} \quad p' = \frac{I}{V}$$

70. *Puissances mises en jeu au repos.*

1° **Puissance fournie par la source continue U_b.** — Cette source débite le courant de repos I_{ao} sous une tension U_b et fournit donc :

$$P_b = U_b I_{ao}$$

2° **Puissance dissipée dans la résistance de charge.** — Celle-ci est traversée par I_{ao} on a donc :

$$P_p = R_a I_{ao}^2$$

3° **Puissance utile.** — Elle est évidemment nulle puisque le tube ne fonctionne pas :

$$P_u = 0$$

4° **Puissance dissipée sur l'anode.** — Nous savons que c'est :

$$P_a = U_{ao} I_{ao}$$

5° **Bilan des puissances.** — On vérifie sans peine que

$$U_{ao}I_{ao} + R_aI_{ao}^2 = (U_{ao} + R_aI_{ao})\,I_{ao} = U_bI_{ao}, \quad \text{soit} \quad P_b = P_a + P_p.$$

Le rendement est nul.

71. *Puissances mises en jeu en charge.*

1° **Puissance fournie par la source continue U_b.** — Elle débite maintenant un courant variant entre $I_{ao} - I_m$ et $I_{ao} + I_m$. On démontre que la puissance moyenne fournie reste

$$P_b = U_bI_{ao}$$

Cette puissance est mesurée sur la figure 170 par l'aire du rectangle OABC.

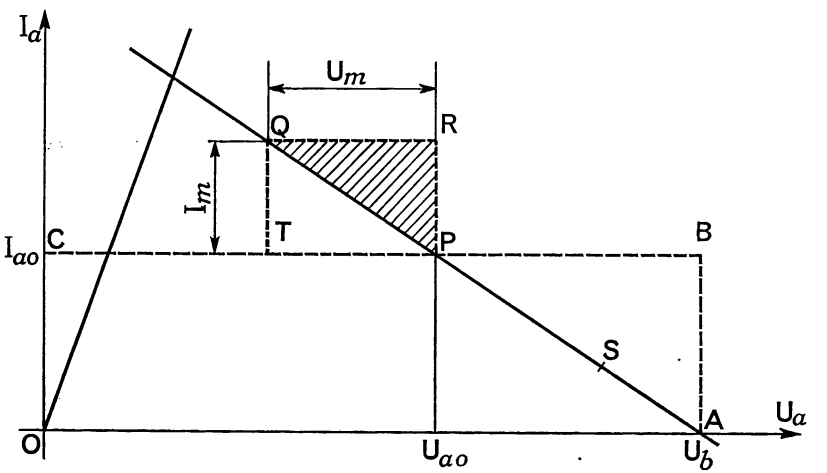


Fig. 170. — *Mise en évidence des puissances.*

2° **Puissance dissipée dans la charge.** — Elle correspond au courant de repos et est inchangée :

$$P_p = R_aI_{ao}^2$$

3° **Puissance utile.** — Elle correspond au courant alternatif qui traverse la charge. Puisque I en est la valeur efficace :

$$P_u = R_aI^2$$

Puisque $U = R_a I$ cette valeur peut s'écrire $R_a I^2 = (R_a I)I = UI$ ou encore en introduisant les valeurs maximales U_m et I_m :

$$P_u = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \times \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{U_m I_m}{2}$$

Sur la figure 170, on voit que $U_m I_m$ est représenté par l'aire du rectangle PRQT, la puissance utile est donc mesurée par l'aire du triangle hachuré PQR.

4° **Rendement.** — La comparaison des aires représentant P_b et P_u nous montre immédiatement que le rendement est faible, il ne dépasse guère quelques pour cent.

$$\eta = \frac{R_a I^2}{U_b I_{ao}}$$

5° **Puissance dissipée sur l'anode.** — On la trouve par différence entre la puissance P_b et la somme des puissances fournies à la résistance R_a. On a donc :

$$P_a = U_b I_{ao} - R_a I_{ao}^2 - R_a I^2$$

Il est clair que cette puissance est inférieure à celle qui était dissipée au repos et ce, de la quantité $R_a I^2$.

La justification physique de ce paradoxe est donnée au problème 11. 14.

REMARQUE. — La puissance consommée par le filament (quelques watts pour les plus petite tubes) doit être ajoutée à la puissance absorbée si l'on veut un bilan exact.

72. *Polarisation automatique.*

1° Dans les récepteurs pour diminuer l'encombrement et simplifier l'équipement on supprime la source de grille en réalisant une **polarisation automatique** de celle-ci grâce au courant anodique de repos.

2° **Montage.** — Une résistance de polarisation R_k est placée entre la cathode et la masse (fig. 171). Traversée par I_{ao} elle crée entre K et M une chute de tension $R_k I_{ao}$. La grille est réunie à la masse par l'intermédiaire d'une résistance R_g de l'ordre de 1 MΩ. Le courant grille étant

nul la tension entre les bornes de R_g est nulle, G et M sont au même potentiel et

$$U_{go} = V_g - V_k = V_m - V_k = - R_k I_{ao}$$

3° **Détermination de R_k.** — Connaissant I_{ao} et U_{go} on a

$$R_k = \frac{| U_{go} |}{I_{ao}}$$

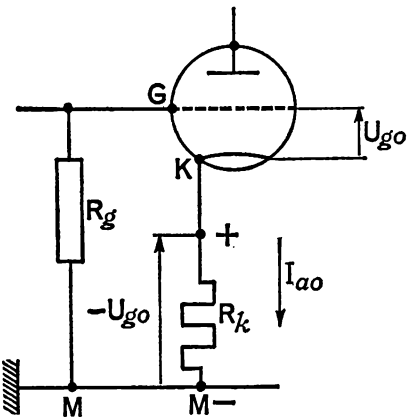


Fig. 171. — *Polarisation automatique.*

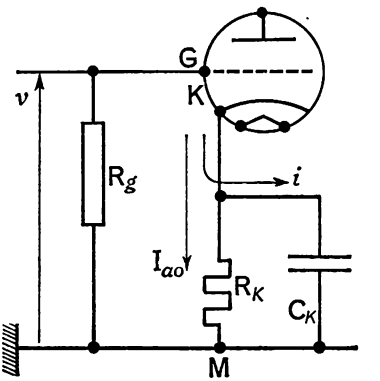


Fig. 172. — *Découplage.*

Par exemple pour avoir P comme point de repos (fig. 164) il faut :

$$R_k = \frac{2}{4{,}75} = 0{,}421\ k\Omega = 421\ \Omega.$$

4° **Découplage de R_k.** — Lorsqu'une tension d'entrée v est appliquée sur la grille le courant anodique est variable : $I_a = I_{ao} + i$, si R_k était traversée par ce courant, U_{go} varierait et le point de repos se déplacerait, il y aurait **contre-réaction;** pour éviter ce phénomène un condensateur de découplage C_k est en parallèle avec la résistance (fig. 172). Si son impédance $\frac{1}{C_k \omega}$ était très petite (C_k très grand) tout le courant alternatif le traverserait et le découplage serait parfait.

En général on se contente d'avoir $\frac{1}{C_k \omega} \simeq \frac{R_k}{10}$ pour la plus petite pulsation à amplifier.

Exemple : si $f = 100$ Hz soit $\omega = 200\,\pi$, avec $R_k = 421\ \Omega$ on trouve $\frac{1}{200\,\pi\,C_k} = 42{,}1$ soit $C_k = \frac{1}{200\,\pi \times 42{,}1} = 38\ \mu F$. Les condensateurs utilisés sont électrochimiques, remarquons que si leur capacité est élevée, ils fonctionnent sous très basse tension.

5° **Remarque.** — Dans le circuit anodique, R_k est en série avec R_a et la charge totale est en fait $R_k + R_a$ et le courant I_{ao} est un peu plus faible que si R_a était seule ; sa nouvelle valeur est déterminée par l'intersection de la caractéristique statique U_{go} et de la droite de charge de pente $-\frac{1}{R_a + R_k}$. En général $R_k \ll R_a$ et la correction ne s'impose pas.

73. *Compléments technologiques.*

1° **Limites d'utilisation du tube triode.** — Deux électrodes métalliques séparées par du vide constituent un condensateur. Le tube comporte donc trois capacités inter-électrodes : anode-grille : C_{ag}, anode-cathode : C_{ak}, cathode-grille : C_{kg}. Ces capacités étant de l'ordre de quelques picofarads.

— En basse fréquence on les néglige.

— En moyenne fréquence il faut en tenir compte.

— En haute fréquence, elles court-circuitent le tube et en interdisent l'emploi.

Exemple. — Pour 4pF on aura :

f (Hz) . .	100	10 000	10^6	10^8
$\frac{1}{C\omega}$ (Ω) .	4×10^8	4×10^6	40 000	400

Pour réduire la capacité anode-grille qui est la plus gênante nous serons amenés à placer une électrode de découplage entre A et G : nous obtiendrons un tube tétrode.

2° **Résistances au carbone.** — Les résistances utilisées en réception ne sont pas bobinées. Elles sont constituées, soit par du carbone

aggloméré et moulé à chaud sous pression, soit par une couche de carbone déposé sur un isolant (porcelaine). Traversées par de faibles courants elles n'ont à dissiper que peu de puissance : 1/10 W à 2 W. Le plus couramment les tolérances sur leur valeur sont ± 10 % ou ± 5 %. Leurs valeurs sont échelonnées suivant une progression géométrique (type série Renard). Entre 10 et 100 on trouve la série suivante (les valeurs principales en gras) :

10 - 11 - 12 - 13 - 15 - 16 - **18** - 20 - **22** - 24 - **27** - 30
33 - 36 - **39** - 43 - **47** - 51 - **56** - 62 - **68** - 75 - **82** - 91.

Entre 100 et 1 000 Ω, on trouve les mêmes valeurs multipliées par 10, etc. On en fabrique jusqu'à 100 MΩ.

Pour la résistance $R_k = 421\ \Omega$, calculée au § précédent on choisirait 430.

3° **Potentiomètres.** — Les potentiomètres utilisés en réception sont constitués par une couche circulaire de carbone sur laquelle se déplace le curseur.

4° **Condensateurs électrolytiques** (ou chimiques). — L'électrode centrale en aluminium est oxydée par électrolyse d'une solution d'acide borique, il se forme une couche d'alumine qui constitue le diélectrique ; cette électrode est le pôle + du condensateur. Le boîtier en aluminium est le pôle —. Ces condensateurs sont donc polarisés, le non-respect de leurs polarités entraîne leur destruction.

EXERCICES

Les exercices **11.** 01 à **11.** 06 utilisent les réseaux du 12 AT 7 tracés au chapitre précédent (exercices **10.** 01 et **10.** 02).

11. 01. — Placer sur le réseau Kellog la droite de charge pour $U_b = 250$ V et $R_a = 25\ k\Omega$ et construire par points la courbe de charge du réseau mutuel.

11. 02. — En conservant les données précédentes on fixe $U_{go} = -1$ V Quelles sont les coordonnées du point de repos P_o? [141 V et 4,35 mA].

11. 03. — Une tension d'entrée $v = 1 \sin\omega t$ est appliquée sur la grille. Déterminer graphiquement le courant anodique et la tension de sortie [$2 I_m = 3{,}2$ et $2 U_m = 81$].

11. 04. — Calculer le gain et la pente dynamique avec les résultats graphiques [$A = 40{,}5$ et $p' = 1{,}6$].

11. 05. — Calculer le gain et la pente dynamique avec la valeur de R_t que l'on déterminera graphiquement au voisinage de P_0 et $\mu = 66$ [$R_t = 16\ k\Omega$; $A = 40$; $p' = 1{,}6$].

11. 06. — La tension d'entrée est maintenant $v = 2 \sin\omega t$. Déterminer les valeurs graphiques de A et de p'. Comparer aux valeurs calculées.

Les exercices **11.** 07 à **11.** 12 utilisent les réseaux idéalisés tracés au chapitre précédent (Problème rédigé **10.** 11). Les paramètres du tube sont rappelés : $R_t = 10\ k\Omega$; $p = 2{,}5$ mA/V; $\mu = 25$.

11. 07. — On choisit $U_b = 250$ V et $R_a = 12{,}5\ k\Omega$. Tracer la droite de charge et construire par point la courbe de charge du réseau mutuel. Quelle est l'équation de la droite?

$$\left[-\frac{U_a}{12{,}5} + 20\right].$$

11. 08. — On fixe $U_{go} = -4$ V. Quelles sont les coordonnées du point de repos? [167 V; 6,6 mA].

11. 09. — Une tension d'entrée $v = 4 \sin\omega t$ est affichée sur la grille, quelles sont les coordonnées des points extrêmes de fonctionnement? [222 V; 2,2 mA et 110 V; 11,2 mA].

11. 10. — Avec les lectures précédentes déterminer les valeurs maximales du courant et de la tension anodique [4,5 mA; 56 V].

11. 11. — Calculer avec les lectures précédentes le gain et la pente dynamique du tube [14; 1,12].

11. 12. — Calculer avec les formules le gain et la pente dynamique du tube [13,9; 1,11].

PROBLÈMES

AVEC SOLUTION.

11. 13. — Un tube triode 6C5 (réseau fig. 154 et 155) est utilisé pour amplifier une tension $v = 3 \sin\omega t$. La haute tension est $U_b = 200$ V et la résistance de charge $R_a = 25\ k\Omega$. La polarisation de la grille est $U_{go} = -3$ V.

1° Écrire l'équation de la droite de charge, la tracer et construire par point la courbe de charge du réseau mutuel.

2° Placer les points extrêmes de fonctionnement et déterminer l'amplitude du courant et de la tension.

3° Calculer le gain et la pente dynamique avec les formules.

4° Avec les résultats du 3° calculer les valeurs efficaces du courant et de la tension. Comparer aux résultats du 2°.

5° Calculer la résistance R_k qui permettrait la polarisation automatique.

— Solution —

Avertissement. — Le lecteur effectuera lui-même les constructions sur les deux réseaux.

1° Droite de charge : $I_a = -\frac{U_a}{25} + \frac{200}{25} = -\frac{U_a}{25} + 8$ elle coupe OI_a à 8 mA.

2° Point de repos : La caractéristique — 3 V n'étant pas tracée on le place au milieu des points d'intersection avec les caractéristiques — 2 et — 4. On trouve $U_{ao} = 112$ V et $I_{ao} = 3{,}6$ mA.

Points extrêmes. — Ils se trouvent sur les caractéristiques 0 et — 6 : 70 V ; 5,2 mA et 152 V ; 1,9 mA.

On a donc :

$$I_m = \frac{5{,}2 - 1{,}9}{2} = 1{,}65 \text{ mA} \qquad U_m = \frac{152 - 70}{2} = 41 \text{ V}$$

3° Gain : $A = -\frac{\mu R_a}{R_t + R_a}$ avec $R_t = 10\,500\ \Omega$ et $\mu = 22$ (chap. 10).

$$A = -\frac{22 \times 25}{10{,}5 + 25} = -15{,}5$$

$$\text{pente } p' = \frac{\mu}{R_t + R_a} = \frac{22}{35{,}5} = 0{,}62 \text{ mA/V}.$$

4° Valeur efficace de la tension grille : $V = \frac{3}{\sqrt{2}} = 2{,}1$ V.

Courant $I = p'V = 0{,}62 \times 2{,}1 = 1{,}3$ mA.

Tension anodique $U = |A|\ V = 15{,}5 \times 2{,}1 = 32{,}5$ V.

Comparaison :

Avec le calcul $I_m = I\sqrt{2} = 1{,}84$ mA $U_m = 32{,}5 \times \sqrt{2} = 46$ V, graphiquement $I_m = 1{,}65$ mA $U_m = 41$ V.

La différence de 10 % environ s'explique par la courbure des caractéristiques, en particulier pour $U_g = -6$ V.

5° $R_k = \frac{|U_{go}|}{I_{ao}} = \frac{3}{3{,}6} = 0{,}833$ kΩ.

On pourra prendre 820 Ω.

11. 14. — Un tube triode dont le réseau est linéaire a une résistance interne de 12 kΩ et une pente de 2,5 mA/V. Il est placé dans les conditions suivantes : $U_b = 360$ V, $R_a = 18$ kΩ, $U_{go} = -5$ V.

1° Écrire l'équation de la droite de charge et calculer I_{ao} sachant que $U_{ao} = 234$ V.

2° Calculer les puissances fournies par la source, consommée par la charge et dissipée sur l'anode quand le tube est au repos.

3° On applique à la grille une tension sinusoïdale de 3 V de valeur efficace. Calculer les valeurs efficaces du courant et de la tension de sortie.

4° Calculer les puissances fournie par la source, consommée par la charge et dissipée sur l'anode quand le tube est utilisé dans les conditions du 3°.

— SOLUTION —

1° Droite de charge : $I_a = -\frac{U_a}{18} + 20$

pour $U_{ao} = 234$ V $\quad I_{ao} = -\frac{234}{18} + 20 = 7$ mA.

REMARQUE. — Nous avons donné U_{ao} pour éviter sa recherche mais les autres données permettaient de trouver sa valeur.

2° *a*) Puissance fournie par la source : la source fournit 7 mA sous une tension de 320 V : $P_b = 360 \times 7 = 2\,520$ mW.

b) Puissance consommée par R_a : $P_p = R_a I_{ao}^2 = 18 \times 7 \times 7 = 882$ mW.

c) Puissance dissipée sur l'anode : $P_a = U_{ao} I_{ao} = 234 \times 7 = 1\,638$ mW.

On vérifie que $P_b = P_p + P_a = 882 + 1\,638 = 2\,520$ mW.

3° $\mu = \rho R_t = 2{,}5 \times 12 = 30$.

Courant : $I = \frac{\mu V}{R_t + R_a} = \frac{30 \times 3}{30} = 3$ mA.

Tension : $U = R_a I = 18 \times 3 = 54$ V ou $|A| = \frac{\mu R_a}{R_t + R_a} = \frac{30 \times 18}{30} = 18$

et $U = |A|\, V = 54$ V

4° *a*) Puissance fournie par la source : $P'_b = 2\,520$ mW comme au repos ;

b) Puissance consommée par R_a :

c'est $P'_p = R_a I_{a'}^2 + R_a I^2 = 882 + 18 \times 9 = 1\,044$ W.

c) Puissance dissipée sur l'anode : par différence $P'_a = 2\,520 - 1\,044 = 1476$ mW.

La puissance dissipée sur l'anode est donc plus petite lorsque le tube fonctionne que lorsqu'il est au repos.

Expliquons cette anomalie apparente :

au repos $U_{ao} = 234$ V, tous les électrons ont donc une énergie de 234 eV.

En fonctionnement, la tension anodique varie entre $234 - 54\sqrt{2} \simeq 158$ V et $234 + 54\sqrt{2} \simeq 310$ V, l'énergie des électrons varie entre 158 eV et 310 eV or le courant étant plus élevé quand la tension est plus faible et plus petit quand la tension est plus grande, il y a davantage d'électrons de faible énergie que d'électrons de grande énergie : au total l'énergie diminue quand le tube fonctionne.

A RÉSOUDRE.

11. 15. — Le point de repos d'un tube triode dont la charge est 25 kΩ a pour coordonnées $U_{ao} = 200$ V, $I_{ao} = 8$ mA. Les paramètres du tube sont $R_t = 15$ kΩ et $p = 3$ mA/V, le réseau est linéaire. La tension à amplifier est $v = 2 \sin \omega t$.

1° Écrire l'équation de la droite de charge.

2° Calculer le gain, la pente dynamique, le courant et la tension de sortie.

11. 16. — Un tube triode a un facteur d'amplification $\mu = 40$ et une résistance interne $R_t = 8$ kΩ, le réseau est linéaire. La tension d'alimentation

est $U_b = 400$ V et la résistance de charge $R_a = 16$ kΩ. Le circuit grille est polarisé à $U_{go} = -5$ V et alimenté par une tension $v = 5\sin\omega t$.

1° Tracer les deux réseaux du tube, écrire l'équation de la droite de charge et déterminer les coordonnées du point de repos.

2° Calculer le gain, la pente dynamique et les valeurs maximales du courant alternatif et de la tension de sortie. Vérifier sur les réseaux.

3° Écrire les expressions instantanées de U_g, I_a et U_a.

4° Calculer au repos et en fonctionnement les puissances :

a) fournies par la source;

b) consommées dans R_a;

c) dissipées sur l'anode.

N. B. — On s'aidera de la solution du **11. 14.**

11. 17. — On veut réaliser, pour le point de repos $U_{go} = -3$ V, $I_{ao} = 6$ mA, la polarisation automatique d'un tube triode, dont la pente est 4 mA/V et la résistance interne 12 *k* Ω.

1° Calculer R_k.

2° La charge du tube est $R_a = 19\,500\ \Omega$, calculer la tension anodique en tenant compte de R_k si la haute tension est $U_b = 300$ V.

3° Une tension $v = 2\sqrt{2}\sin\omega t$ est affichée sur la grille. La résistance R_k étant découplée parfaitement, calculer la tension de sortie.

4° Déterminer la capacité de découplage pour que à 150 Hz son impédance soit égale au dixième de R_k.

AVERTISSEMENT. — Les trois problèmes suivants proposent la détermination des paramètres par la méthode d'Appleton. Deux applications numériques sont proposées, la réponse de la première est donnée.

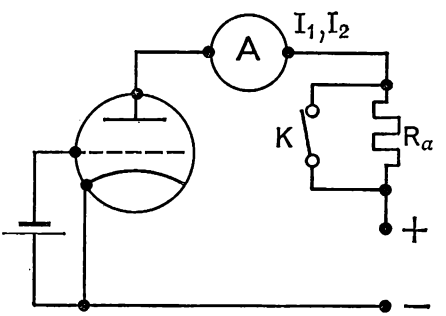


Fig. 173.

11. 18. — Détermination de R_t (fig. 173). Le courant anodique mesuré par l'ampèremètre est I_1 quand l'interrupteur K est ouvert et I_2 quand il est fermé. Exprimer la résistance interne du tube en fonction de R_a, I_1, I_2. On appliquera la formule de définition de R_t et on s'aidera d'un réseau Kellog sommairement tracé sur lequel les points de fonctionnement correspondant à K ouvert et K fermé seront placés.

Applications numériques (R en kΩ, I en mA).

R_a	I_1	I_2	R_t
20	4	12	10
12	5	8	?

11. 19. — Détermination de μ (fig. 174). Pour une valeur R_1 de R, le courant anodique est I_a quand l'interrupteur K est en position 1. Si l'on passe K en position 2, le courant augmente et l'on doit ajuster R à la valeur R_2 pour retrouver I_a. Exprimer le facteur d'amplification en fonction de R_1 et de R_2. On appliquera la formule de définition de μ et on écrira la loi d'Ohm relative au circuit grille et au circuit anodique pour chaque position de l'interrupteur.

Application numérique (R en ohms) :

R_1	R_2	μ
500	20 500	40
150	3 000	?

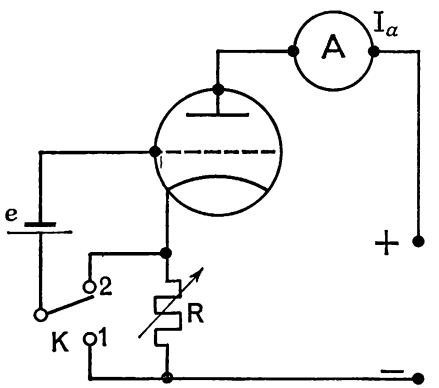


Fig. 174.

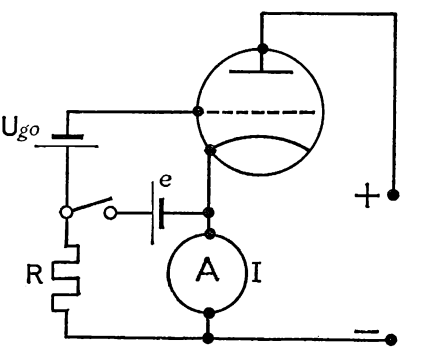


Fig. 175.

11. 20. — Détermination de p (fig. 175). L'interrupteur K étant ouvert l'ampèremètre indique un courant I. Quand on ferme K le courant varie et il faut donner à la résistance la valeur R pour rétablir I. Exprimer la pente en fonction de R. On appliquera la formule de définition de p et on appliquera la loi d'Ohm au circuit grille pour chaque position de K.

Application numérique (R en ohms, p en mA/V) :

R	p
250	4
170	?

12

LE TRANSISTOR

74. *Définitions.*

1° Description. — Un transistor à jonctions est un monocristal de semi-conducteur (germanium ou silicium) dopé de façon à comporter trois régions :

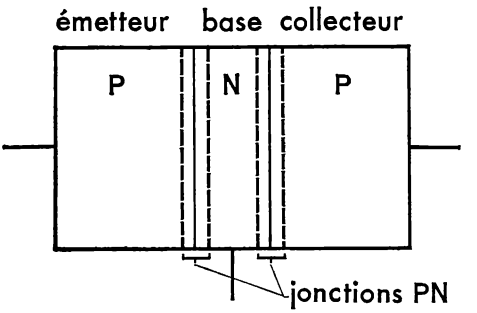


Fig. 176. — *Transistor P N P.*

— deux de même conductibilité extrinsèque appelées ÉMETTEUR et COLLECTEUR ;

— une de conductibilité opposée appelée BASE et placée entre les deux autres.

Deux versions peuvent donc être réalisées et le sont effectivement :

émetteur P — base N — collecteur P : en abrégé PNP (fig. 176) ;

émetteur N — base P — collecteur N : en abrégé NPN (fig. 177).

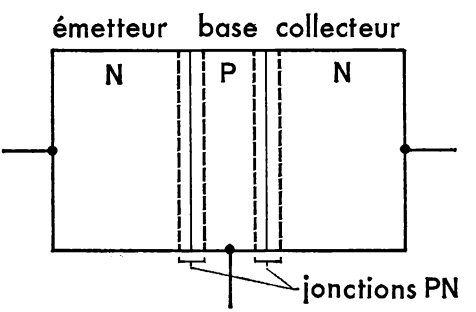


Fig. 177. — *Transistor N P N.*

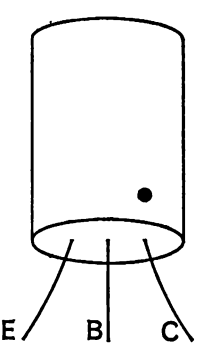


Fig. 178. — *Repérage des bornes.*

Notre étude sera effectuée avec le PNP, un paragraphe précisera l'adaptation des résultats au NPN.

Chaque électrode possède une connexion de sortie, le collecteur est repéré par un point rouge placé sur le capot et la base est au milieu (fig. 178).

2° **Symboles.** — Deux symboles sont actuellement employés, nous utiliserons le numéro 2 (fig. 179).

3° **Conventions.** — a) *Courants :* Trois courants entrent ou sortent du transistor, le courant de base I_B, le courant d'émetteur I_E et le courant de collecteur I_C.

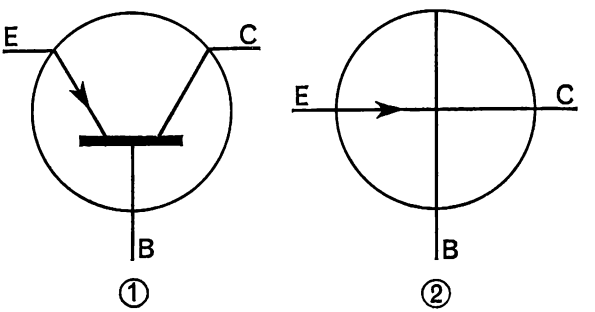


Fig. 179. — *Symboles d'un transistor P N P.*

Le même sens positif a été retenu pour chacun d'eux : de l'extérieur vers le transistor (fig. 180). On a donc la relation fondamentale (nœud de courant) :

$$\textbf{(26)} \qquad \boxed{I_B + I_E + I_C = 0}$$

Remarquons que l'un des courants au moins sera nécessairement négatif. **Nous placerons le sens conventionnel sur les fils et en cas de nécessité le sens réel à côté des fils.**

b) *Tensions.* — Elles sont habituellement notées (fig. 180) :

entre émetteur et collecteur : $V_{CE} = V_C - V_E = - V_{EC}$
entre base et émetteur : $V_{BE} = V_B - V_E = - V_{EB}$
entre collecteur et base : $V_{CB} = V_C - V_B = - V_{BC}$

L'indice précise donc que **la tension est conventionnellement mesurée de la deuxième électrode vers la première.** Nous continuerons à représenter les tensions par des vecteurs ayant pour origine la borne électrode de référence.

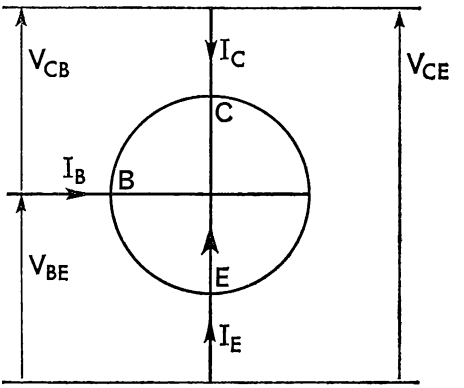


Fig. 180. — *Conventions P N P.*

EXEMPLE. — Quel que soit son signe, V_{CE} est représentée par un vecteur ayant son origine en E et son extrémité en C; $V_{CE} = -5$ V signifie la tension entre E et C est de 5 volts et que le plus est en E.

75. *Constitution.*

1° **Dimensions.** — **L'épaisseur de la base est très faible,** de l'ordre de la dizaine de microns. La surface de jonction entre le collecteur et la base est 2 à 3 fois plus grande que celle de jonction entre l'émetteur et la base. Ces surfaces sont de l'ordre du mm² (fig. 181).

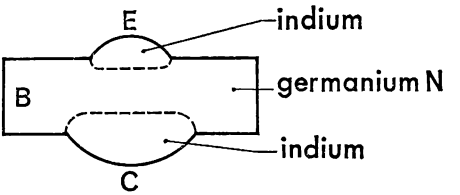


Fig. 181. — *Transistor P N P.*

2° **Dopages.** — La base est plus faiblement dopée que le collecteur, ce dernier étant lui-même plus faiblement dopé que l'émetteur.

3° **Fabrication.** — a) *Par tirage* (Exemple NPN). — On tire lentement un cristal N, (germanium + arsenic), on introduit un accepteur P (indium) puis un donneur N (arsenic).

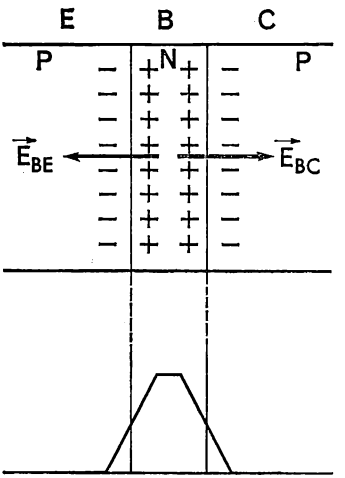


Fig. 182.

b) *Par alliage* (Exemple PNP). — Sur chaque face d'une pastille de germanium N on place une bille d'accepteur (indium), la jonction est obtenue par fusion de l'indium (fig. 181).

c) *Par diffusion* (Exemple NPN). — Le cristal initial de type P est placé dans une atmosphère gazeuse contenant un donneur N, ce dernier contamine le cristal en surface.

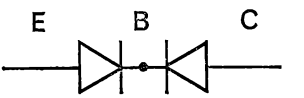


Fig. 183.

4° La double jonction.

a) *Les deux jonctions PN sont opposées.* — Elles créent deux champs électriques en opposition et une double barrière de potentiel (fig. 182). Cette double barrière interdit aux trous et aux électrons aussi bien le trajet E → C que le trajet C → E.

b) *Comparaison à deux diodes.* — Les deux jonctions semblent pouvoir être assimilées à deux diodes en opposition (fig. 183). Il y a cependant deux différences importantes dans le transistor : la dissymétrie entre émetteur et collecteur et la distance séparant les deux jonctions qui est très faible (l'épaisseur de la base).

c) *Essai en double diode.* — Si l'on applique une tension continue entre émetteur et collecteur (fig. 184), le courant reste très faible quelles que soient les polarités ;

— Quand C est positif, la jonction CB est polarisée dans le sens passant mais la jonction EB est polarisée

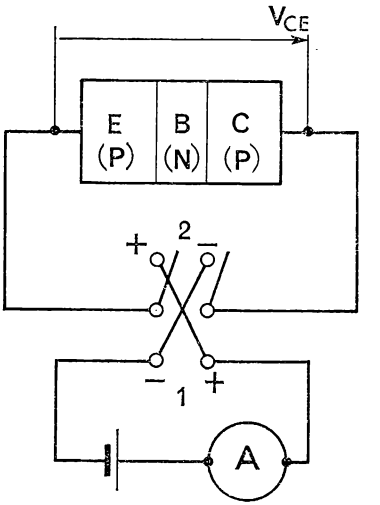


Fig. 184. — *Le très faible courant confirme la présence de deux jonctions en opposition.*

dans le sens inverse et ne se laisse traverser que par son courant inverse.

— Quand E est positif, la jonction EB est passante mais BC est en inverse.

Les courants ainsi mesurés sont dits résiduels à circuit de base ouvert, ils correspondent au courant inverse de l'une ou de l'autre des deux jonctions.

Avec le transistor PNP, type AC 125 on relève :
l'inverseur étant en 1, pour $V_{CE} = +10$ V (+ en C) : $|I_C| = 20\ \mu A$,
l'inverseur étant en 2, pour $V_{CE} = -10$ V (— en C) : $|I_C| = 300\ \mu A$.

La faiblesse de ces deux courants nous confirme bien la présence de deux jonctions en opposition, leur différence de valeurs nous confirme la dissymétrie entre émetteur et collecteur.

76. *Montage base commune.*

1° Courant résiduel collecteur-base, à émetteur ouvert. — L'émetteur n'étant pas connecté (émetteur ouvert), polarisons la diode collecteur-base en inverse : ⊕ en B et ⊖ en C (fig. 185).

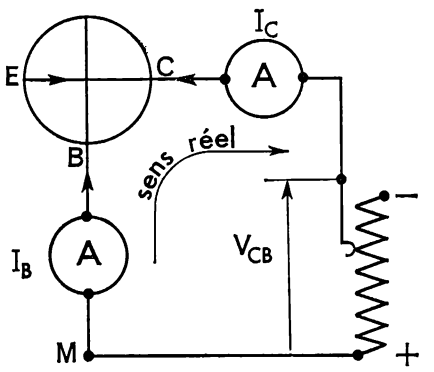


Fig. 185. — *Mesure de* I_{CBO}.

Pour une tension $V_{CB} = -10$ V et à 20 °C, nous relevons un courant de 3 μA ; ce courant est noté I_{CBO} et l'on a, en valeurs algébriques [1] :

$$I_{CBO} = I_C = -I_B < 0$$

I_{CBO} n'est autre que le courant inverse de la jonction collecteur-base, ses propriétés sont celles d'un courant inverse de diode :

— Il est à peu près indépendant de V_{CB}, sauf pour les toutes petites valeurs (fig. 186).

— Pour V_{CB} positif, I_{CBO} deviendrait très grand et positif, ce serait le courant direct de la diode CB (fig. 186).

— Il varie beaucoup avec la température : avec un transistor au

(1) Courant de collecteur, I_{CBO} est mesuré dans le même sens que I_C.

germanium il double à peu près pour une augmentation de température de 10 °C ; avec du silicium il double pour 6 °C. Rappelons que cette forte croissance avec la température est due à la multiplication des paires électrons-trous de la conductibilité intrinsèque (fig. 187).

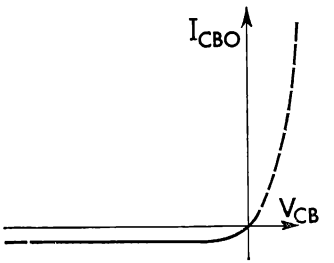


Fig. 186.

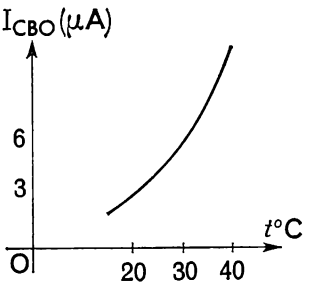


Fig. 187.

2° **Montage expérimental** (fig. 188). — L'émetteur étant positif par rapport à la base, la jonction EB est polarisée dans le sens direct (de P vers N) ; par contre le collecteur étant négatif par rapport à la

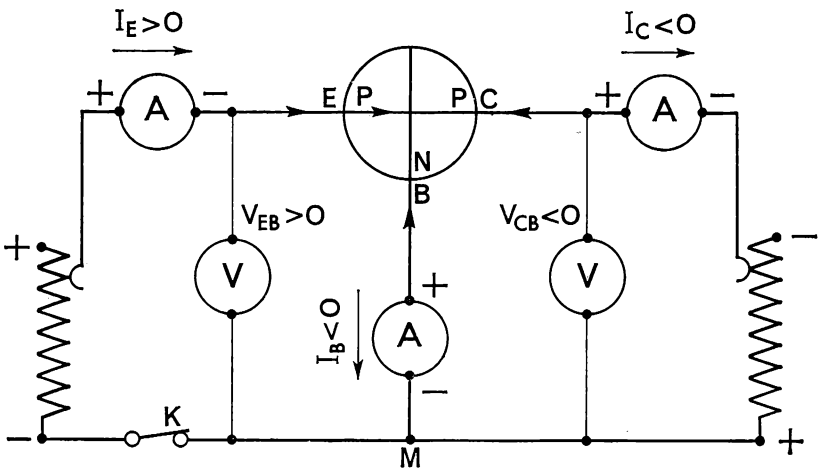


Fig. 188. — *Montage expérimental en base commune.*

base la jonction BC est polarisée dans le sens Non-Passant (de N vers P). Compte tenu des conventions de signes et des polarités des sources ($V_{EB} > 0$ et $V_{CB} < 0$) on aura pour les courants : I_E positif et I_C négatif ;

l'expérience nous donnera le signe de I_B. Les ampèremètres utilisés sont polarisés et à faible chute de tension, les consommations des voltmètres sont négligeables.

3° **Tracé d'une caractéristique $I_C = f(V_{CB})$.** — Fixons le courant d'émetteur à 20 mA ($I_E = +20$) et relevons simultanément I_C et I_B pour plusieurs valeurs de V_{CB} :

V_{CB} (V)	0	— 5	—10	—15	—20
I_C (mA) . . .	—19,72	—19,76	—19,80	—19,83	—19,86
I_B (mA) . . .	— 0,28	— 0,24	— 0,20	— 0,17	— 0,14

Nous constatons que : *a*) I_C est pratiquement indépendant de V_{CB}, la caractéristique est à peu près parallèle à l'axe V_{CB} (fig. 189).

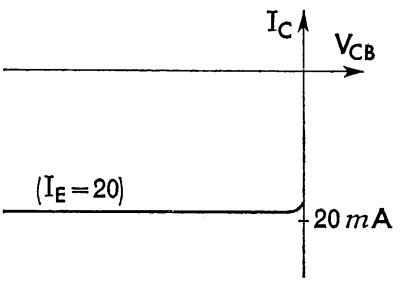


Fig. 189. — *Caractéristique pour* $I_E = 20$.

b) I_C est presque égal [1] à I_E, la mesure de I_B nous le confirme : I_B est très faible, de plus il va de B vers M, il est donc négatif comme I_C.

4° **Réseau de sortie $I_C = f(V_{CB})$.** — Il se trace en retenant I_E comme paramètre. La tension V_{EB} est mesurée à titre documentaire, *ce n'est pas elle le paramètre*, elle doit être réglée pour donner le courant I_E choisi. Les caractéristiques sont sensiblement rectilignes, parallèles entre elles et à l'axe des tensions. V_{CB} et I_C étant négatifs le réseau devrait, en principe, être tracé dans le 3e quadrant; on peut le tracer dans le 1er quadrant en portant sur les axes les valeurs de $-V_{CB}$ et de $-I_C$ (fig. 190). Pour $I_E = 0$, la caractéristique $I_C = I_{CBO}$ est, à l'échelle choisie, pratiquement confondue avec l'axe.

77. *Justification physique des résultats.*

1° **Le courant résiduel I_{CBO}.** — La jonction base-collecteur étant polarisée dans le sens inverse, le courant I_{CBO} reste très faible parce qu'il correspond au passage dans le sens base → collecteur de porteurs posi-

(1) La différence est trop faible pour être décelée sur l'ampèremètre qui mesure I_C, ce dernier a été calculé par différence entre I_E et $|I_B|$.

tifs et que ceux-ci sont très peu nombreux dans la base (porteurs minoritaires).

2° **Effet transistor.** — Il y a dans les résultats de l'expérience du § 76, 3° (fig. 188) deux anomalies apparentes à expliquer :

— la jonction collecteur-base étant polarisée dans le sens inverse

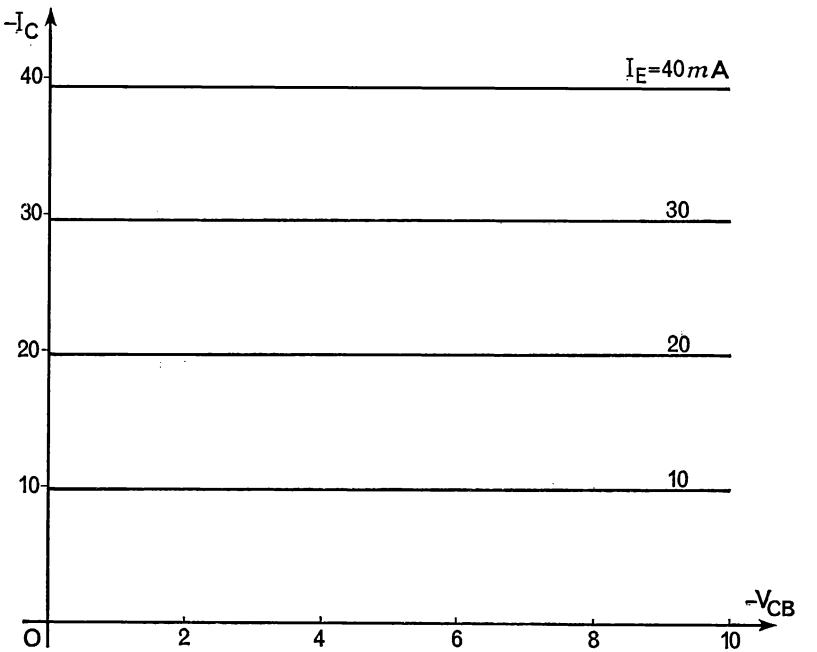


Fig. 190. — *Réseau de sortie* — $I_C = f(-V_{CB})$.

on pouvait s'attendre à un courant de collecteur très faible, de l'ordre de I_{CBO}, or I_0 est important, presque égal à I_E ;

— la jonction émetteur-base étant polarisée dans le sens direct on pouvait s'attendre à un courant de base presque égal à I_E, or il est très faible.

Ce double phénomène est appelé « effet transistor ».

3° **Justification de l'effet transistor.** — *a*) La diode (ou jonction) émetteur-base étant polarisée dans le sens direct, la barrière de potentiel est abaissée et des trous positifs, porteurs majoritaires de l'émetteur, sont injectés dans la base ;

b) La base se trouve maintenant inondée de porteurs positifs, or

elle contient beaucoup de porteurs négatifs (électrons), pourquoi n'y a-t-il pas recombinaison? Parce que la base étant très mince la plupart des porteurs positifs injectés par l'émetteur atteignent « sur leur lancée » la jonction collecteur-base. Ils se trouvent alors propulsés dans le collecteur par le champ $\vec{E}_{BC}$ (fig. 191).

c) Une fois arrivés dans le collecteur, les porteurs positifs sont évacués par le pôle négatif de la source V_{CB}.

d) Cependant quelques trous ont le temps de se recombiner [1]

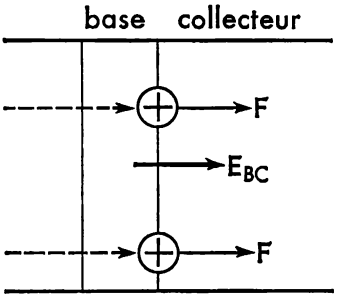


Fig. 191. — *Les porteurs positifs qui arrivent sur la jonction BC sont propulsés dans le collecteur.*

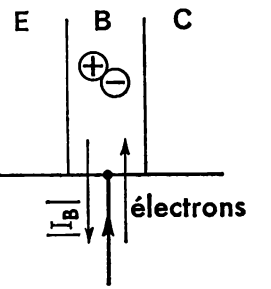


Fig. 192. — *La recombinaison appelle des électrons.*

dans la base avec les électrons de celle-ci. Le remplacement de ces électrons donne naissance au courant base (fig. 192).

e) L'effet transistor ne peut être obtenu avec deux diodes en opposition car il faut:

— qu'il y ait continuité du cristal de l'émetteur au collecteur;

— que la base soit très mince sans quoi la recombinaison y est totale.

78. *Les courants dans le montage base commune.*

1° Le courant d'émetteur. — La formule 26, $I_B + I_E + I_C = 0$ conduit à $I_E = -I_B - I_C$ ou si l'on préfère à

$$I_E = |I_B| + |I_C|$$

(1) On dit qu'ils sont piégés.

le courant I_E, seul positif, est égal à la somme des valeurs absolues de I_B et de I_C.

2° **Le courant de collecteur.** — Un simple coup d'œil sur le réseau (fig, 190) nous montre que le courant de collecteur est inférieur au courant d'émetteur mais de très peu ; comme de plus, il est pratiquement indépendant de V_{CB} nous poserons :

$$|I_C| = \alpha I_E \text{ soit en valeurs algébriques,}$$

$$\textbf{(27)} \qquad \boxed{I_C = -\alpha I_E}$$

où α est un coefficient de proportionnalité :

— inférieur à 1 mais de très peu ;

— pratiquement indépendant de I_E et de V_{CB}.

Calculons α avec les mesures précédentes (§ 76) pour $V_{CB} = -10$ V :

$$\alpha = -\frac{I_C}{I_E} = \frac{19{,}8}{20} = 0{,}99$$

REMARQUE. — En toute rigueur, l'expression de I_C devrait contenir le courant résiduel I_{CBO} et l'on aurait $I_C = -\alpha I_E + I_{CBO}$. Pour simplifier, et parce que $|I_{CBO}| \ll |I_C|$ ($3\mu A \ll 10$ mA), nous négligerons I_{CBO}.

3° **Le courant de base.** — La formule (26) nous conduit à

$$I_B = -I_E - I_C = -I_E - (-\alpha I_E) = -I_E(1-\alpha)$$

$$\boxed{I_B = -I_E(1-\alpha)}$$

4° **Valeurs relatives des courants.** — Les trois courants étant en valeurs absolues : I_E; $|I_C| = \alpha I_E$ et $|I_B| = I_E(1-\alpha)$ nous pouvons écrire :

$$\textbf{(27 bis)} \qquad \boxed{\frac{I_E}{1} = \frac{|I_C|}{\alpha} = \frac{|I_B|}{1-\alpha}}$$

Autrement dit, un courant émetteur $I_E = 1$ se partage en un courant de collecteur égal à α et un courant de base égal à $1-\alpha$ (fig. 193).

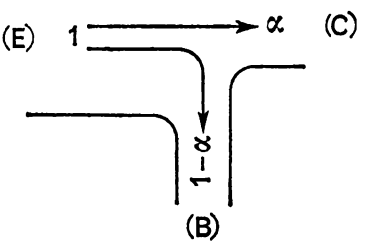


Fig. 193.
Valeurs relatives des courants.

EXEMPLE : Avec $\alpha = 0{,}99$ et $I_E = 20$ mA, on trouve :

$$|I_C| = 0{,}99 \times 20 = 19{,}8 \text{ et } |I_B| = 0{,}01 \times 20 = 0{,}2$$

5° **Gain en courant.** — Une variation ΔI_E du courant émetteur produit des variations ΔI_C du courant collecteur et ΔI_B du courant base ; puisque α est constant, on aura à la fois :

$$I_C = -\alpha I_E \Rightarrow \Delta I_C = -\alpha \Delta I_E$$

$$I_B = -(1-\alpha)\ I_E \Rightarrow \Delta I_B = -(1-\alpha)\Delta I_E$$

Le coefficient α précédemment défini est appelé gain en courant :

(28) $$\boxed{\alpha = -\frac{\Delta I_C}{\Delta I_E} = \left|\frac{\Delta I_C}{\Delta I_E}\right|}$$

Ce gain varie, selon le transistor entre 0,95 et 0,995 ; **il est toujours inférieur à l'unité.**

Dans le montage base commune, le transistor n'amplifie pas en courant.

REMARQUES. — I. La somme des variations des trois courants est nulle :

$$\Delta I_E + \Delta I_B + \Delta I_C = \Delta I_E - (1-\alpha)\Delta I_E - \alpha \Delta I_E = 0$$

II. La relation (27 bis) valable pour les courants l'est également pour les variations et l'on a :

$$\frac{\Delta I_E}{1} = \frac{|\Delta I_C|}{\alpha} = \frac{|\Delta I_B|}{1-\alpha}$$

79. *Amplification*[1].

1° **Montage.** — Par rapport à la figure 188, une source donnant le signal à amplifier est ajoutée ainsi qu'une résistance de charge R_C (fig. 194). Les condensateurs découplent les tensions continues à l'entrée et à la sortie et la résistance R évite le court-circuitage du signal. Les appareils de mesures ne sont plus représentés.

(1) Le montage base commune n'étant pratiquement pas utilisé, notre étude sera très sommaire.

2° **Fonctionnement.** — Les variations ΔV_{EB} produisent des variations ΔI_E du courant d'émetteur et le courant de collecteur varie de $\Delta I_C = -\alpha \Delta I_E$.

3° **Résistance d'entrée.** — C'est le quotient $r'_e = \frac{\Delta V_{EB}}{\Delta I_E}$ à tension V_{CB} constante. La diode EB étant polarisée dans le sens direct **r'_e est faible** de l'ordre de 10 Ω à 100 Ω.

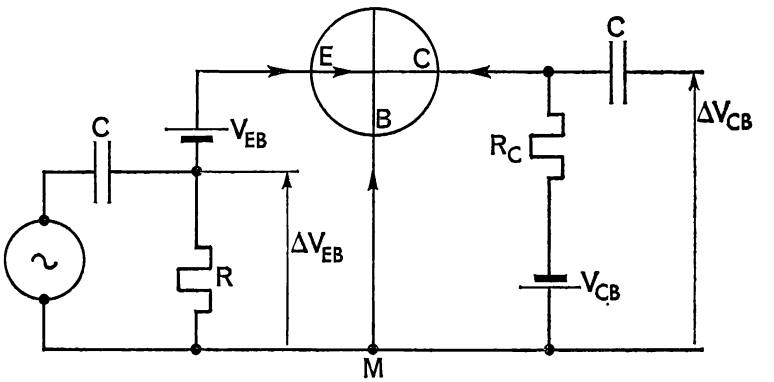


Fig. 194. — *Amplification.*

4° **Résistance de sortie.** — C'est le quotient $r'_s = \frac{\Delta V_{CB}}{\Delta I_C}$ à courant I_E constant. La diode CB étant polarisée dans le sens inverse **r'_s est très grande,** de l'ordre de 100 $k\Omega$.

Compte tenu de ces deux valeurs r'_e et r'_s il est possible de choisir la charge R_C telle que :

$$r'_e \ll R_C \ll r'_s$$

Il en résultera que le courant I_C qui existerait sans la charge n'est pratiquement pas modifié par la présence de celle-ci. C'est pourquoi nous avons pu écrire au 2° que $\Delta I_C = -\alpha \Delta I_E$.

5° **Gain en puissance.** — a) *Puissance à l'entrée.* — Elle est fournie par la source d'alternatif, c'est :

$$p_e = r'_e (\Delta I_E)^2$$

b) *Puissance à la sortie.* — Elle est fournie à la charge, c'est :

$$p_s = R_c (\Delta I_C)^2$$

c) *Gain en puissance :*

$$A = \frac{p_s}{p_e} = \frac{R_c\,(\Delta I_C)^2}{r'_e\,(\Delta I_E)^2} = \frac{R_c}{r'_e}\,\alpha^2$$

pour $r'_e = 10\ \Omega$ et $R_c = 1\,000\ \Omega$ $\quad A = \frac{1\,000}{10}\,\alpha^2 = 98$ (avec $\alpha = 0{,}99$).

En base commune le transistor ne procure aucun gain en courant mais en puissance son gain est de l'ordre de 100.

Le gain en tension serait aussi égal à 100.

6° **Origine du mot transistor.** — Le transistor permet, en base commune, d'avoir un courant de sortie presque égal au courant d'entrée mais dans une résistance beaucoup plus grande : il transfère un courant donné d'une résistance faible dans une résistance élevée. En anglais, résistance se dit résistor d'où, par contraction :

TRANSISTOR = TRANSfert-résISTOR

80. *Le transistor NPN.*

1° L'émetteur et le collecteur sont de type N et la base de type P (revoir fig. 177).

2° **Symboles.** — Seul le sens de la flèche placée dans le symbole est inversé (fig. 195).

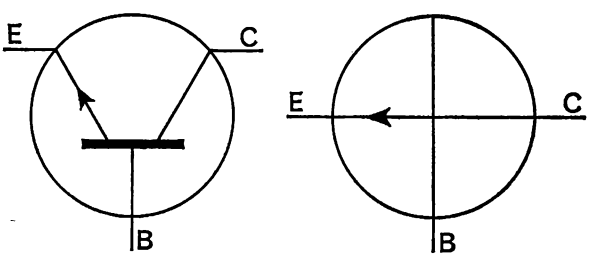


Fig. 195. — *Symboles N P N.*

3° **Conventions.** — **Elles sont inchangées** (fig. 196).

4° **Montage base commune.** — Les polarités des sources doivent être permutées (fig. 197). On a donc : $V_{EB} < 0$ et $V_{CB} > 0$.

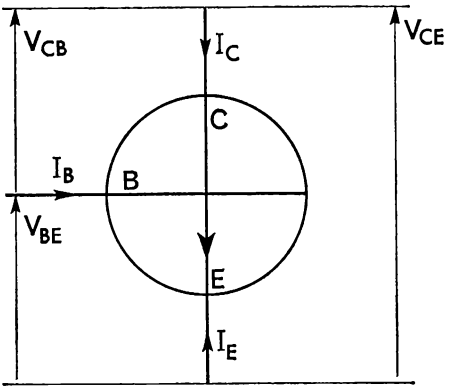


Fig. 196. — *Conventions N P N.*

Les sens réels des courants sont aussi inversés et l'on a :

$$I_E < 0 \qquad I_B > 0 \qquad I_C > 0$$

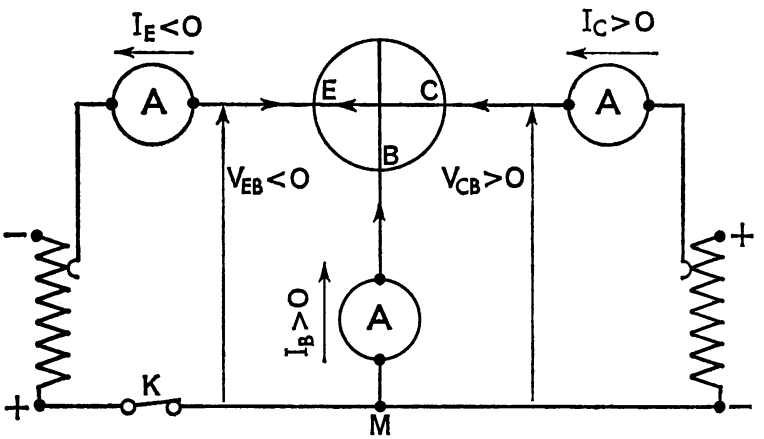


Fig. 197. — *Montage expérimental du N P N.*

5° **Relations entre courants.** — Tous les courants ayant conservés leur sens conventionnel les relations sont inchangées. Rappelons :

$$(26)\ I_B + I_E + I_C = 0 \qquad (27)\ I_C = -\alpha I_E \text{ (avec } I_E < 0)$$

Le gain en courant est toujours :

$$\alpha = -\frac{\Delta I_C}{\Delta I_E} = \left|\frac{\Delta I_C}{\Delta I_E}\right|$$

6° **Justification physique.** — Il suffit de permuter dans celle du PNP le rôle des porteurs positifs et celui des porteurs négatifs.

La jonction BE étant polarisée dans le sens passant, les porteurs négatifs de l'émetteur traversent cette jonction et atteignent le collecteur à travers la base et la jonction BC. Cependant quelques électrons sont piégés dans la base par les porteurs positifs (majoritaires) de celle-ci.

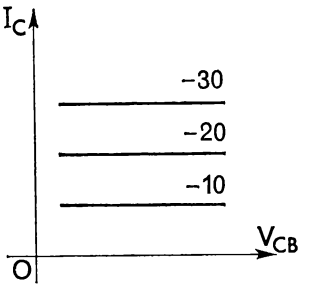


Fig. 198.
Réseau d'un N P N.

7° **Réseau de sortie.** I_O et V_{CB} étant maintenant positifs le réseau est **naturellement** tracé dans le premier quadrant avec des valeurs positives (fig. 198), par contre, les valeurs de I_E sont négatives.

REMARQUE. — Qu'il s'agisse du PNP ou du NPN, on notera que la flèche placée sur le symbole donne toujours le sens réel du courant émetteur.

EXERCICES

12. 01. — Calculer α et le courant de base pour les valeurs (arithmétiques) suivantes des courants émetteur et collecteur (mA) :

I_E	50	150	100	40	120
I_O	48	146	98	37	117

[1re colonne : $\alpha = 0{,}96$; $I_B = 2$]

12. 02. — Calculer I_O et I_B pour les valeurs suivantes de I_E (mA) et de α :

I_E	150	120	50	70	140
α	0,98	0,97	0,96	0,975	0,99

[1re colonne : $I_O = 147$; $I_B = 3$]

12. 03. — Tracer la courbe $I_E = f(V_{EB})$ et déterminer la résistance d'entrée au voisinage de chaque couple de valeurs.

V_{EB} (mV) ..	50	75	100	125	150	175
I_E (mA) ..	0,2	0,4	0,8	2,4	6	12

12. 04. — Le courant de collecteur d'un transistor PNP pour $I_E = 15$ mA est $I_C = -14$ mA pour $V_{CB} = -5$ V et $I_C = -14{,}02$ mA pour $V_{CB} = -10$ V. Calculer la résistance de sortie [250 000 Ω].

12. 05. — Modifier le montage de la fig. 194 pour un transistor NPN et indiquer les sens réels des courants.

12. 06. — Calculer le gain en puissance avec les valeurs suivantes :

α	0,96	0,99	0,97	0,98	0,995
r'_e (Ω) . .	50	120	20	250	100
R_C (kΩ) . .	2	5	1	10	15

[1re colonne : A = 36,8]

13

LE TRANSISTOR PNP EN ÉMETTEUR COMMUN

81. *Réseau de sortie.*

1° **Montage.** — La jonction PN de la diode base-émetteur est polarisée dans le sens direct, les porteurs positifs (trous) de l'émetteur sont donc propulsés à travers la base vers le collecteur. Les sens conventionnels des tensions et des courants sont les mêmes que dans le montage base commune.

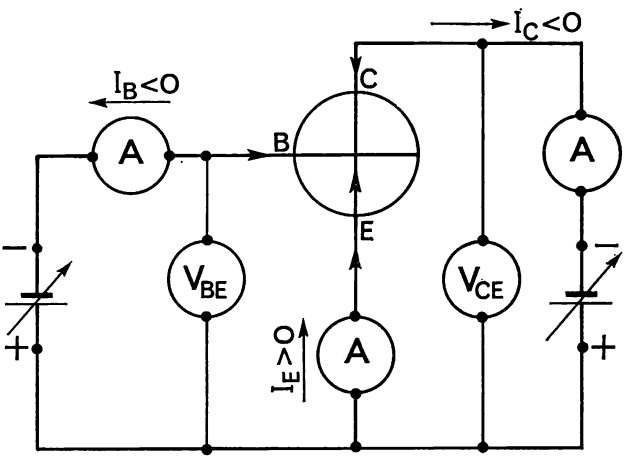


Fig. 199. — *Montage expérimental en emetteur commun d'un P N P.*
(Les sens réels des courants sont précisés à côté des ampèremètres).

La tension V_{BE} doit être faible, de quelques dixièmes de volts; la tension V_{CE} étant de quelques volts, la tension collecteur-base $V_{CB} = V_{CE} - V_{BE}$ est donc négative comme dans le montage base commune : **toutes les polarités relatives sont donc les mêmes dans les deux montages. Les sens réels des courants sont les mêmes aussi** (fig. 199).

2° **Comparaison avec le tube triode** (fig. 200).

a) *Correspondances :*

cathode = émetteur grille = base anode = collecteur

b) Le montage émetteur commun correspond au montage cathode à la masse.

c) Dans le PNP l'émetteur émet des trous alors que, dans le tube triode, la cathode émet des électrons. Par rapport à la masse (K ou E) les polarisations de B et de G sont identiques, celles de C et de A sont opposées.

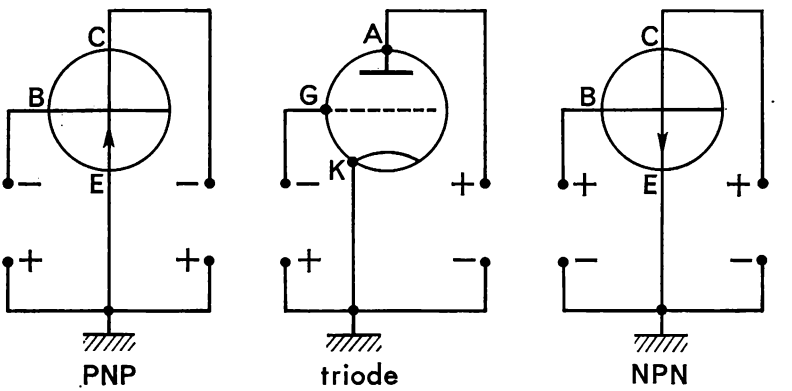


Fig. 200. — *Comparaison du tube triode et des transistors.*

d) Dans le NPN, l'émetteur émet des électrons comme la cathode. Par rapport à la masse (K ou E) les polarisations de B et de G sont opposées, celles de C et de A sont identiques.

e) La commande du tube triode est obtenue par la tension de grille, celle du transistor par le courant de base.

3° **Définition.** — On appelle réseau de sortie d'un transistor en émetteur commun le réseau des caractéristiques $-I_C = f(-V_{CE})$ tracées avec $-I_B$ comme paramètre. Il correspond au réseau Kellog des tubes à vide : $I_a = f(U_a)$ avec U_g comme paramètre.

4° **Tracé.** — Pour chaque valeur du courant de base on fait varier V_{CE} et on relève I_C. Pour éviter un échauffement du transistor, il est prudent de plonger le capot dans l'eau ou dans l'huile.

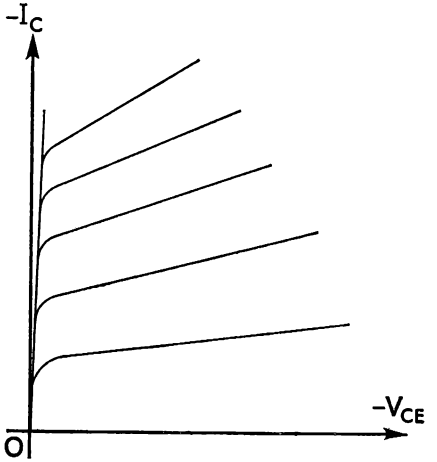


Fig. 201.

5° Courbes. — Elles sont sensiblement rectilignes mais ne sont plus parallèles à l'axe ni entre elles [1] (fig. 201). Quand $|I_B|$ augmente elles sont de plus en plus inclinées. Le courant de collecteur dépend donc aussi de V_{CE}. Pour les très petites valeurs de V_{CE}, les caractéristiques ont une partie commune.

82. *Paramètres.*

1° Gain en courant. — C'est le rapport $\beta = \dfrac{-\Delta I_C}{-\Delta I_B} = \dfrac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$ d'une variation de courant collecteur à la variation de courant base correspondante, déterminé pour une tension V_{CE} donnée.

$$\textbf{(29)} \qquad \boxed{\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}} \qquad \textbf{pour } V_{CE} = \text{Cte}$$

Exemples pris sur le réseau 202.
a) Pour $V_{CE} = -4$ V.

Entre	$\lvert I_{B2}\rvert - \lvert I_{B1}\rvert = \lvert \Delta I_B\rvert$	$\lvert \Delta I_C\rvert$	β
P et Q	0,2 — 0,1 = 0,1	12,7	127
Q et R	0,3 — 0,2 = 0,1	11,8	118
R et S	0,4 — 0,3 = 0,1	9,5	95
S et T	0,5 — 0,4 = 0,1	9	90

(1) Comme c'était le cas dans le montage base commune pour le réseau $-I_C = f(-V_{CB})$.

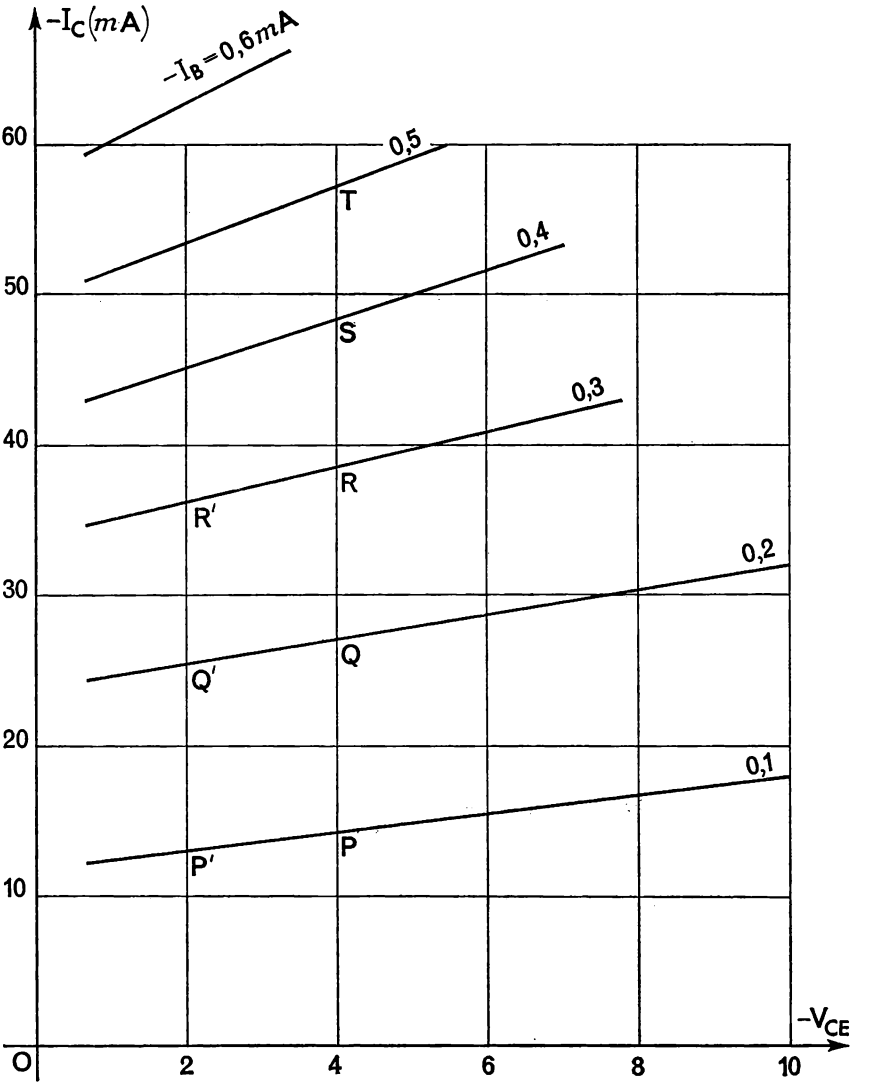


Fig. 202. — *Réseau de sortie du transistor P N P AC 125.*

On constate que β diminue quand $|I_B|$ augmente.

b) Entre $-I_B = 0{,}1$ et $-I_B = 0{,}2$ pour plusieurs valeurs de V_{CE} :

$-V_{CE}$	ΔI_C	β
2	12,3	123
4	12,7	127
6	13	130

On constate que β augmente un peu quand $|V_{CE}|$ augmente.

Avec un transistor moins puissant ($< 0{,}1$ W), β serait presque constant.

2° Relation avec α. — Rappelons que (§ 78, 5°) :

$$\Delta I_B = -(1-\alpha)\ \Delta I_B \qquad \text{et} \qquad \Delta I_C = -\alpha\ \Delta I_E$$

On a donc : $\beta = \dfrac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \dfrac{-\alpha\,\Delta I_E}{-(1-\alpha)\,\Delta I_E} = \dfrac{\alpha}{1-\alpha}$

(30) $$\boxed{\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}}$$

Inversement calculons α en fonction de β :

$$\beta(1-\alpha) = \alpha \Leftrightarrow \beta - \alpha\beta = \alpha \Leftrightarrow \alpha + \alpha\beta = \beta \text{ soit}$$

(30 *bis*) $$\boxed{\alpha = \frac{\beta}{1+\beta}}$$

Nous avions trouvé $\alpha = 0{,}99$, nous aurons β « calculé » :

$$\beta = \frac{1}{1-0{,}99} = 100$$

qui est du même ordre de grandeur que les β du tableau. La différence vient de l'imprécision avec laquelle α est connu.

REMARQUE. — Alors que β varie, nous avons vu que α était pratiquement constant. La raison en est qu'une faible variation de α produit une grande variation de β. Calculons β pour quelques valeurs de α.

α .	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	0,995
$1-\alpha$.	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01	0,005
β .	19	24	32,3	49	99	199

Quand α varie de 0,95 à 0,995 (5 %), β est multiplié par 10!

3° **Résistance de sortie.** — C'est le quotient $r_s = \frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C}$ pour un courant de base donné

$$\textbf{(31)} \qquad \boxed{r_s = \frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C}} \qquad \textbf{pour } I_B = \text{Cte}$$

Cette résistance de sortie est beaucoup plus faible que dans le montage base commune où les caractéristiques étaient à peu près parallèles à l'axe des tensions (le rapport $\frac{r'_s}{r_s}$ est de l'ordre de β).

Cette résistance varie avec la caractéristique retenue mais reste constante (indépendante de V_{CE}) sur une caractéristique donnée puisque celle-ci est rectiligne.

EXEMPLES. — Pour $|\Delta V_{CE}| = 2$ V (entre — 2 et — 4)

$-I_B$	ENTRE	$\lvert\Delta I_C\rvert$	r_s ($k\Omega$)
0,1	P′ et P	1,33	1,5
0,2	Q′ et Q	1,5	1,33
0,3	R′ et R	2,3	0,86

→ r_s diminue quand $-I_B$ augmente.

La résistance de sortie d'un transistor correspond à la résistance interne d'un tube triode.

83. *Équation d'une caractéristique.*

1° **Rappel.** — Les formules 26 et 27 ne sont pas particulières à un montage, leur transformation nous permettra d'exprimer I_C en fonction de I_B.

$$(26)\ I_B + I_E + I_C = 0 \qquad (27)\ I_C = -\alpha I_E$$

2° **Première expression de I_C.**

(26) conduit à $I_E = -I_B - I_C$ qui reporté dans (27) donne :

$$I_C = +\alpha I_B + \alpha I_C \Rightarrow I_C(1-\alpha) = \alpha I_B \text{ soit}$$

$$I_C = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B \text{ et puisque } \beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}.$$

$$\textbf{(32)} \qquad \boxed{I_C = \beta I_B}$$

Rappelons que I_C et I_B sont négatifs pour un PNP.

3° **Influence de V_{CE}.** — *a*) Dans le montage base commune, la résistance de sortie était très grande et la tension V_{CB} avait peu d'influence sur le courant de collecteur (caractéristiques parallèles à l'axe des tensions). Si nous avions cependant voulu en tenir compte il aurait fallu écrire :

$$I_C = -\alpha I_E + \frac{V_{CB}}{r'_e}$$

En nous reportant au tableau (p. 172) on voit que pour la caractéristique $I_E = 20$ mA, I_C varie de 19,72 à 19,86 quand V_{CB} varie de 0 à 20 V. C'est pourquoi nous avons négligé ce terme $\frac{V_{CB}}{r'_e} = 0{,}14$ mA devant $I_C \simeq 20$ mA.

b) Dans le montage émetteur commun, les caractéristiques sont loin d'être parallèles à l'axe des tensions : l'influence de V_{CE} n'est pas totalement négligeable. Pour la caractéristique $I_B = -0{,}2$ mA le courant I_C varie de 1,5 mA quand V_{CE} varie de -2 à -4 V (entre Q′ et Q, fig. 202), cette variation n'est pas négligeable.

c) *Deuxième expression de I_c.* — En tenant compte de l'influence de V_{CE} nous devons écrire :

$$\textbf{(32 \textit{bis})} \qquad \boxed{I_C = \beta I_B + \frac{V_{CE}}{r_e}}$$

La valeur de β' étant celle qui correspond à $V_{CE} = 0$.

4° **Existence d'un courant collecteur-émetteur à circuit de base ouvert.** — Ce courant résiduel noté I_{CEO} peut être mesuré en ouvrant le circuit de base (fig. 203). Relevons sa valeur pour quelques valeurs de V_{CE} :

$-V_{CE}$ (V)	5	10	15	20
$-I_{CEO}$ (μA)	290	300	310	320

I_{CEO} est négatif car c'est un courant collecteur : $I_{CEO} = I_C = -I_E < 0$

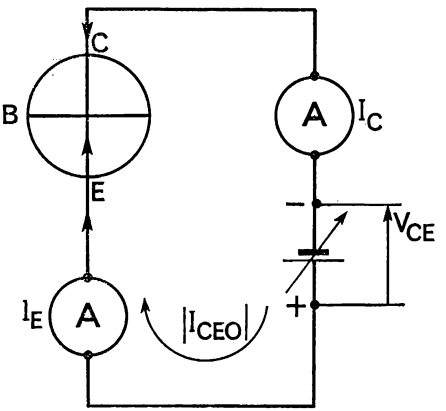


Fig. 203. — *Mesure de* I_{CEO}.

Nous constatons que :

a) I_{CEO} est faible (300 μA) mais beaucoup plus grand que I_{CBO} (3 μA).

b) I_{CEO} est à peu près indépendant de V_{CE}.

REMARQUES. — I. en toute rigueur l'expression de I_C devrait tenir compte de I_{CEO} et l'on aurait $I_C = \beta I_B + \frac{V_{CE}}{r_s} + I_{CEO}$.

Pour simplifier nous négligerons ce courant résiduel ($I_{CEO} \ll I_C$) qui, d'ailleurs, n'intervient pas dans les variations de courants ; cependant nous devrons préciser le rôle de ce courant en cas de variation de température.

II. On démontre que : $I_{CEO} = \frac{I_{CBO}}{1-\alpha}$ ce qui avec $I_{CBO} = 3$ μA et $\alpha = 0{,}99$ redonne bien $I_{CEO} = \frac{3}{0{,}01} = 300$ μA.

84. *Influence de la température.*

1° Sur le courant résiduel. — Le courant résiduel I_{CEO} est comme I_{CBO} très sensible à la température : il double tous les 10 ou tous les 6 degrés (§ 76).

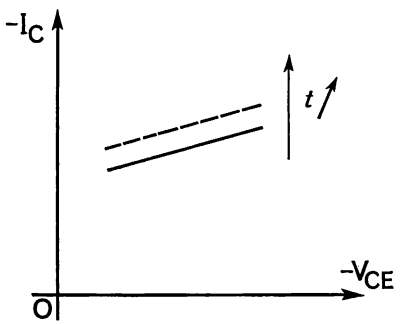


Fig. 203 *bis.* — *Déplacement d'une caractéristique quand la température augmente.*

Étant donné qu'à 20 °C, $I_{CEO} \simeq 100\ I_{CBO}$ on comprendra sans peine qu'une élévation de température de quelques dizaines de degrés produise des variations intolérables de I_{CEO} et par suite de I_C. Par exemple, avec du germanium, un courant I_{CEO} valant 0,3 mA à 20 °C atteindrait 20 mA à 80 °C.

Il sera nécessaire de stabiliser en température les montages contenant des transistors.

2° Sur les caractéristiques du réseau de sortie. — Toute augmentation de I_{CEO} entraînant une augmentation identique de I_C, les variations de température produisent dans le réseau de sortie une translation verticale des caractéristiques (fig. 203 *bis*).

85. *Autres réseaux.*

1° Réseau $-I_C = f(-I_B)$. — Il se trace à tension $V_{CE} = Cte$ avec le montage précédent (fig. 199). Il peut se déduire du réseau de sortie comme le réseau mutuel d'un tube triode peut se déduire du réseau Kellog. Relevons sur la figure 202 les points pour $-V_{CE} = 2$ V et traçons la caractéristique :

$-I_B$ . . .	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
$-I_C$ . . .	0,3	13	25,5	36,5	45	53,5	62

elle est sensiblement rectiligne (fig. 204). Pour d'autres valeurs de $-V_{CE}$ on obtient des courbes à peine différentes.

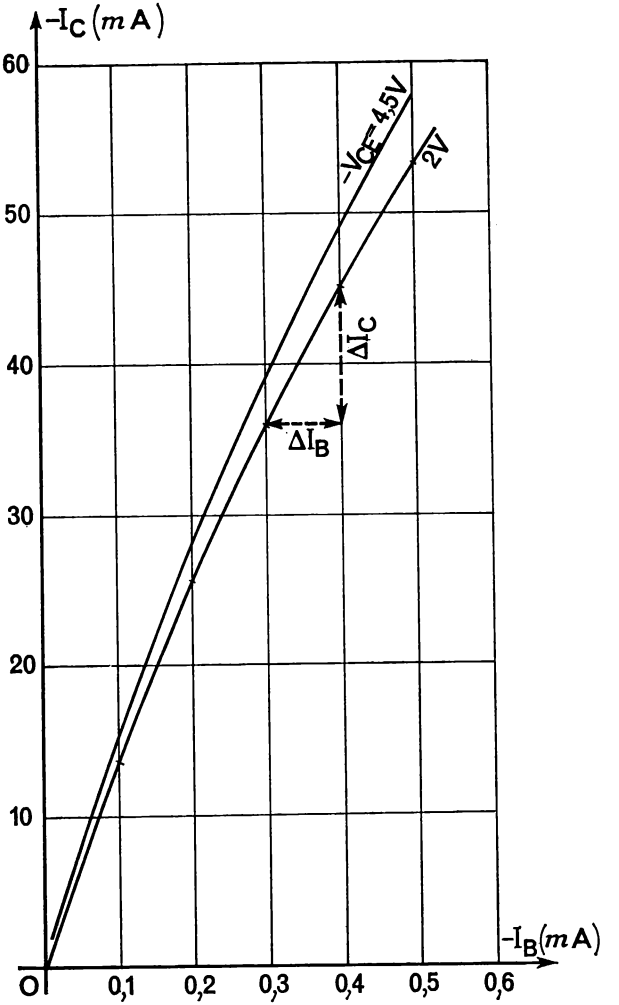


Fig. 204. — *Réseau* $-I_C = f(-I_B)$ *et mesure de* β.

2° **Pente des caractéristiques.** — C'est le rapport $\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$ déjà défini. On voit à nouveau que β varie un peu avec I_B pour un V_{CE} donné et varie un peu avec V_{CE} pour I_B donné.

3° **Correspondance avec le réseau de sortie.** — Au point P du réseau de sortie correspond le point P′ du nouveau réseau (fig. 205); l'hyperbole de dissipation maximale $P_m = 500$ mW a été placée.

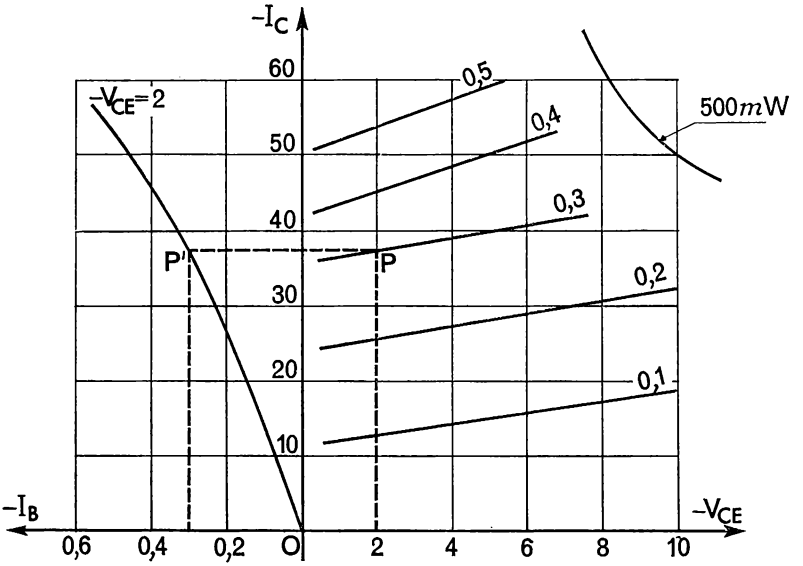


Fig. 205. — *Correspondance des deux réseaux.*
(Le réseau — $I_C = f(-I_B)$ a été retourné).

4° **Réseau — $V_{BE} = f(-I_B)$.** — Il se trace à tension V_{CE} constante. Il renseigne sur la tension à appliquer entre la base et l'émetteur pour avoir un courant de base donné (fig. 206). Il peut être relevé avec le montage 199. Sauf pour les très faibles valeurs de $-V_{CE}$ ($< 0{,}5$ V), les caractéristiques sont pratiquement superposées, c'est pourquoi nous n'en avons tracé qu'une.

5° **Résistance d'entrée.** — C'est le quotient

$$r_e = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B}$$

pour une tension V_{CE} donnée et pratiquement pour tout V_{CE} puisque les caractéristiques sont confondues. Cette résistance est la « pente » de la caractéristique (fig. 206), elle varie beaucoup avec V_{BE}.

(33) $\boxed{r_e = \dfrac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B}}$ **pour $V_{CE} = Cte$**

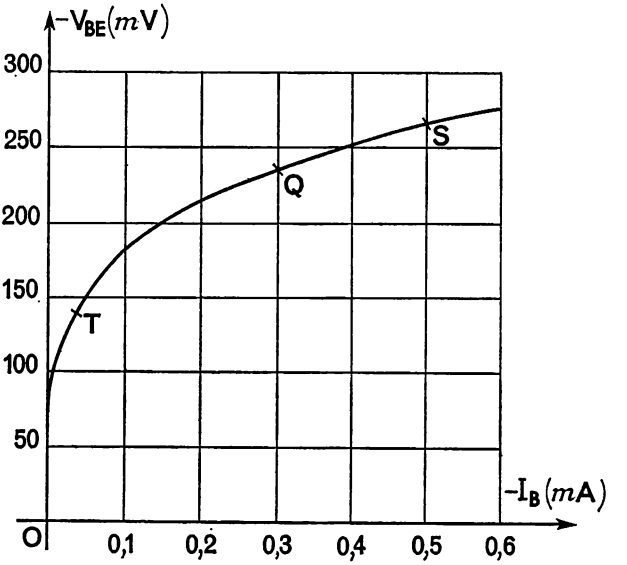


Fig. 206. — *Courbe unique du réseau* — $V_{BE} = f(-I_B)$ *quel que soit* — $V_{CE} > 0{,}5$ *V.*

Exemple. — Au voisinage de $-V_{BE} = 250$ mV on relève entre Q et S :

$$\Delta I_B = 0{,}2 \text{ mA}$$

$$\text{et } \Delta V_{BE} = 30 \text{ mV}$$

$$\text{soit } r_e = \frac{30}{0{,}2} = 150\ \Omega$$

au voisinage de T on aurait $r_e \simeq 1\,000\ \Omega$.

Le transistor devant être commandé en courant I_B constant, il sera nécessaire de prévoir un dispositif rendant I_B indépendant des variations de V_{BE}.

6° Réseau $-V_{BE} = f(-V_{CE})$. — Il se trace à courant de base I_B

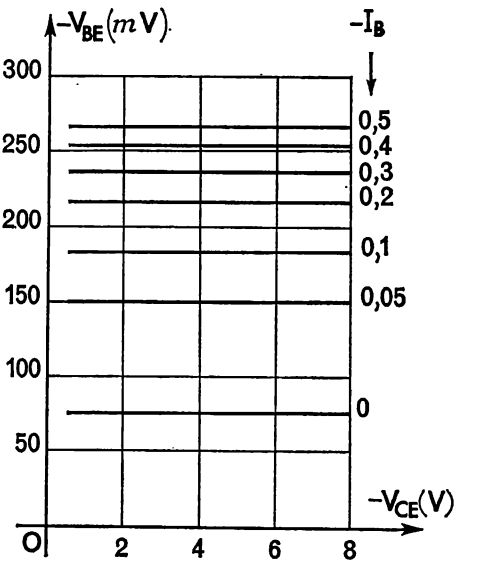


Fig. 207. — *Réseau* — $V_{BE} = f(-V_{CE})$.

constant et peut aussi se déduire du réseau précédent (fig. 207). Les caractéristiques sont à peu près rectilignes et parallèles entre elles ; elles sont très peu inclinées par rapport à l'axe des V_{CE} et de plus en plus serrées quand $|I_B|$ croît.

7° **Rapport de réaction.** — C'est, à courant de base constant, le quotient :

$$\textbf{(34)} \qquad \boxed{h_{12} = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta V_{CE}}} \qquad \textbf{pour } I_B = \text{Cte}$$

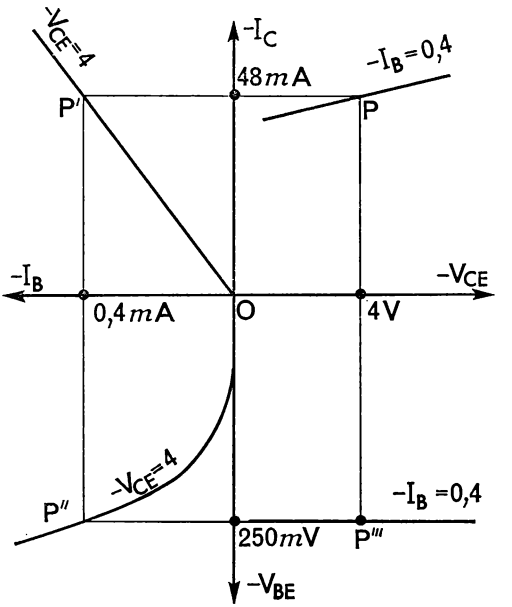


Fig. 208. — *Mise en évidence des correspondances entre les quatre réseaux placés dos à dos.*

Puisque V_{BE} varie très peu avec V_{CE}, h_{12} est très petit, de l'ordre de 10^{-3} ; quotient de deux tensions, h_{12} est un nombre abstrait ; il est égal à la pente des caractéristiques rectilignes du réseau $-V_{BE} = f(-V_{CE})$.

8° **Correspondance entre les quatre réseaux.** — Ils ne sont pas indépendants l'un de l'autre. Un point P du réseau de sortie a son image dans les autres. Les réseaux ont été placés dos à dos (fig. 208).

9° **Paramètres hybrides.** — Nous signalons simplement leur appellation, ils sont notés :

$$h_{11} = r_e \qquad h_{21} = \beta \qquad h_{22} = \frac{1}{r_s} \qquad \text{et} \qquad h_{12}$$

En cas de risque de confusion, un e est ajouté en indice pour rappeler qu'il s'agit du montage en émetteur commun.

86. *Droite de charge.*

1° **Montage en continu avec charge R_C** (fig. 209). — La charge R_C n'est pas négligeable devant r_s comme dans le montage en base commune où r'_s était très grand devant R_C. Soit V_{CC} la tension de la source de collecteur mesurée comme l'indique la figure, V_{CC} est négatif ;

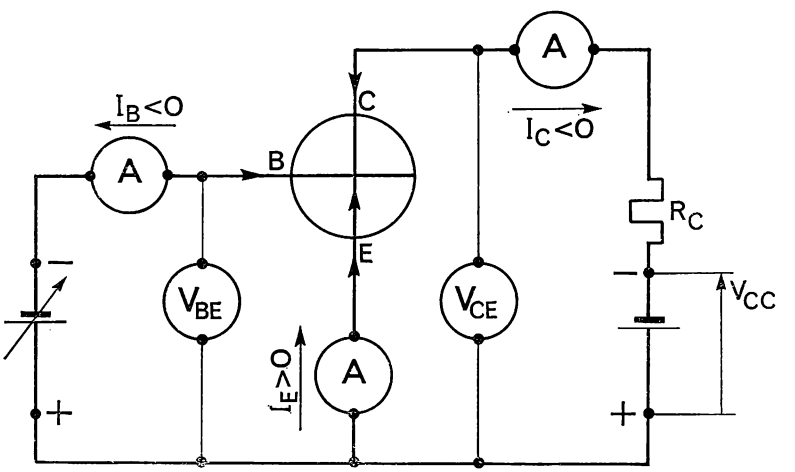


Fig. 209. — *Tracé de la droite de charge.*

la loi d'Ohm (ou de Kirchhoff) appliquée au circuit de collecteur **avec les sens conventionnels,** donne :

$$\textbf{(35)} \qquad \boxed{V_{CC} = V_{CE} + R_C I_C}$$

Cette relation est rigoureusement identique à celle d'un tube triode $U_b = U_a + R_a I_a$.

Bien entendu, pour le transistor PNP, les trois grandeurs V_{CC}, V_{CE} et I_C sont négatives. **Enfin n'oublions pas que V_{CE} et I_C dépendent aussi du courant de base I_B bien que celui-ci ne figure pas dans la formule.**

2° **Équation.** — De la formule 35, on tire $R_C I_C = V_{CC} - V_{CE}$, soit :

(35 *bis*) $$\boxed{I_C = -\frac{V_{CE}}{R_C} + \frac{V_{CC}}{R_C}}$$

Cette équation de la droite de charge est identique à celle du tube triode :

— la « pente » est $-\frac{1}{R_C}$.

— les points d'intersection avec les axes sont :

— avec l'axe des I_C ($V_{CE} = 0$) : $I_0 = \frac{V_{CC}}{R}$;

— avec l'axe des V_{CE} ($I_C = 0$) : $V_{CE} = V_{CC}$.

La connaissance de V_{CC} et de R_C permet donc la mise en place de la droite sur le réseau de sortie (fig. 210).

EXEMPLE. — Pour $V_{CC} = -10$ V et $R_C = 200\ \Omega = 0{,}2\ k\Omega$ on a $I_0 = -50 mA$.

3° **Tracé.** — Le tracé expérimental est effectué en faisant varier I_B dans le montage 209.

4° **Courbe de charge du réseau — $I_C = f(-I_B)$.** — Elle se construit point par point à partir de la droite de charge (fig. 210).

87. Transistor NPN.

1° **Montage.** — Nous donnons uniquement le montage avec charge (fig. 211). Par rapport à celui du PNP la seule modification à effectuer est l'inversion des polarités des sources ; on a maintenant $V_{CC} > 0$ et $V_{BE} > 0$; il en résulte une inversion des sens réels des courants.

2° **Signe des grandeurs.** — Les conventions de signe des courants et des tensions étant les mêmes on aura :

— tensions : $V_{BE} > 0$ et $V_{CE} > 0$

— courants : $I_B > 0$; $I_E < 0$; $I_C > 0$ et $I_{CEO} > 0$.

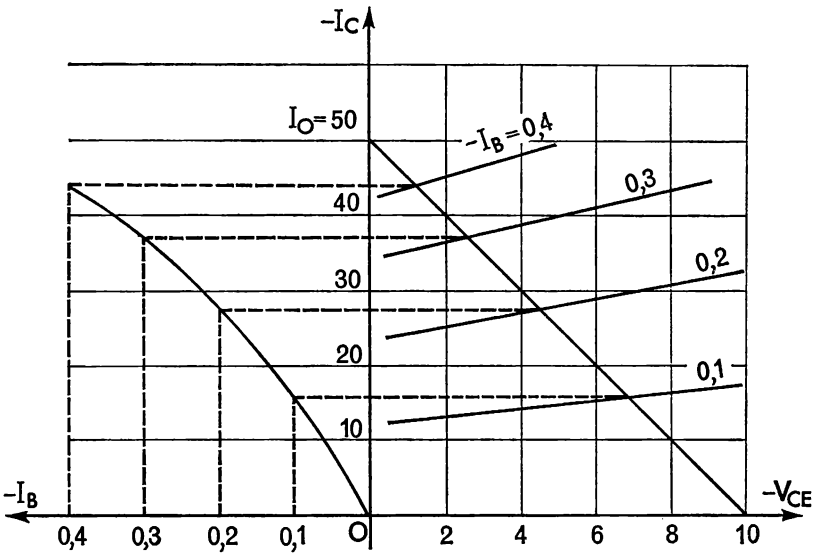


Fig. 210. — *Droite de charge du réseau de sortie et courbe de charge du réseau* $-I_C = f(-I_B)$ *pour* $R_C = 200\ \Omega$ *et* $V_{CE} = -10\ V$.

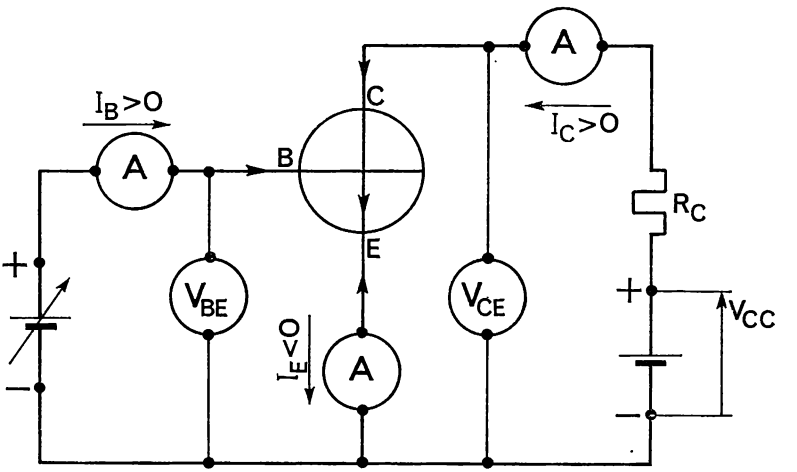


Fig. 211. — *Montage du N P N avec charge.*

Les quatre grandeurs V_{BE}, V_{CE}, I_B et I_C qui figurent dans les réseaux et qui étaient négatives pour un PNP sont donc positives pour un NPN ; les réseaux d'un NPN se traceront en supprimant les signes moins portés devant les variables des réseaux du PNP.

EXERCICES

AVERTISSEMENT. — Les formules et calculs étant identiques pour un PNP et pour un NPN, nous n'avons pas jugé utile de préciser le type de transistor concerné. Une donnée telle que $I_C = 100$ mA correspond en fait à un NPN. Pour un PNP il faut lire — $I_C = 100$ mA.

Les exercices 1 à 9 utilisent le réseau simplifié de la figure 212 (β indépendant de I_B). Il sera bon de reproduire ce réseau sur papier millimétré.

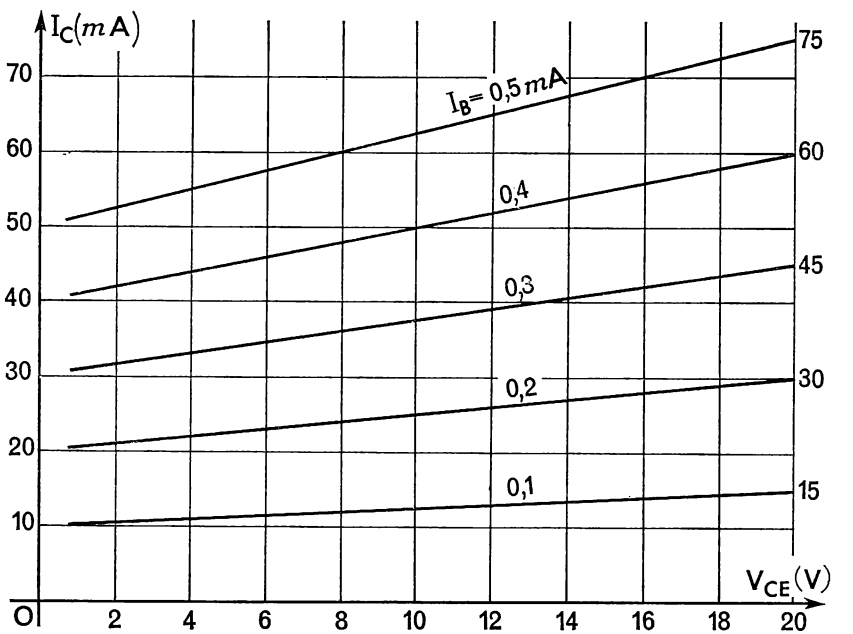


Fig. 212.

13. 01. — Calculer la résistance de sortie correspondant à chaque caractéristique [pour $I_B = 0{,}2$; $r_s = 2\ k\Omega$].

13. 02. — Calculer β pour les tensions V_{CE} suivantes : 2, 4, 6, 8, 10 V [pour 8 V ; $\beta = 120$].

13. 03. — Calculer α pour chaque valeur de β trouvée à l'exercice précédent [$\beta = 120 \Rightarrow \alpha = 0{,}992$].

13. 04. — Tracer les caractéristiques $I_C = f(I_B)$ pour les valeurs suivantes de V_{CE} : 2, 4, 6, 8, 10 V.

13. 05. — Placer sur le réseau l'hyperbole de dissipation maximale $P_m = 500$ mW.

13. 06. — Placer la droite D de charge pour $V_{CC} = 20$ V et $R_C = 400\ \Omega$.

13. 07. — Placer la droite D′ de charge pour $V_{CC} = 16$ V et $R_C = 200\ \Omega$.

13. 08. — Écrire les équations des droites de charge précédentes $\left[\text{pour D, en mA, } I_C = 50 - \frac{V_{CE}}{0{,}4}\right]$.

13. 09. — Construire par point les deux courbes de charge correspondant à D et D′ dans le réseau $I_C = f(I_B)$.

13. 10. — Déterminer au voisinage de chaque valeur donnée de I_B la résistance d'entrée d'un transistor pour lequel on a relevé :

I_B (mA) . .	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
V_{BE} (mV) . .	0,15	0,19	0,22	0,24	0,25

13. 11. — Tracer les caractéristiques $V_{BE} = f(V_{CE})$ à I_B constant du transistor précédent.

PROBLÈMES

13. 12. — Tracer le réseau de sortie approché d'un transistor pour lequel $\beta = 80$ et $r_s = 5\ k\Omega$ pour toutes valeurs de I_B et de V_{CE}. On choisira les valeurs 0,1 à 0,5 mA pour I_B et 2 à 10 V pour V_{CE}. En déduire le réseau $I_C = f(I_B)$. Que constate-t-on?

13. 13. — Pour différentes valeurs de I_B et de V_{CE} on a relevé le courant de collecteur (mA) d'un transistor dont la puissance maximale est 1 W.

I_B (mA) / V_{CE} (V)	0,5	1	2	3	4
2	60	110	190	250	310
5	61,5	113	199	265	331

1° Tracer le réseau de sortie en supposant les caractéristiques rectilignes. Placer l'hyperbole de dissipation maximale.

2° En déduire le réseau $I_C = f(I_B)$.

3° Déterminer les valeurs de β au voisinage des valeurs entières de I_B (mA) et pour $V_{CE} = 2$ V.

4° Déterminer la résistance de sortie pour chaque droite du réseau.

5° Écrire les équations de ces droites.

14

AMPLIFICATION PAR TRANSISTOR MONTAGE ÉMETTEUR COMMUN

AVERTISSEMENT. — Pour supprimer les signes moins, nous raisonnons sur un NPN. L'adaptation des résultats au PNP n'offre pas de difficultés, il suffit de mettre un signe moins devant les grandeurs courant et tension. Bien entendu les polarités des sources doivent être permutées sur les schémas.

88. *Conséquences d'une variation de courant base.*

1° **Point de repos.** — Il est à l'intersection de la droite de charge et de la caractéristique correspondant au courant de base choisi. Par exemple avec $V_{CC} = 10$ V et $R_C = 200\ \Omega$ (comme sur la fig. 210), pour $I_{B0} = 0{,}2$ mA on trouve (fig. 213) : coordonnées [1] de P : $V_{CE0} = 4{,}5$ V et $I_{C0} = 27{,}5$ mA. On en déduit sans difficulté le point P′ (0,2 mA ; 27,5 mA) de l'autre réseau.

2° **Variations de I_B.** — A partir du point de repos et par action sur V_{BE}, faisons varier le courant base de ± 0,1 mA. I_B varie donc entre 0,1 et 0,3 mA et le point de fonctionnement se déplace sur la droite de charge de part et d'autre de P, entre Q et S. Relevons les coordonnées de ces deux points (fig. 213) :

Q (6,8 V ; 16 mA) S (2,5 V ; 37 mA)

De Q à S nous obtenons les variations suivantes :
Pour I_B : 0,3 — 0,1 = 0,2 mA. Pour I_C : 37 — 16 = 21 mA.
Pour V_{CE} : 2,5 — 6,8 = — 4,3 V.
Nous constatons que :
a) Les 0,2 mA de variation du courant base produisent une variation de 21 mA du courant collecteur.
→ La variation du courant base se retrouve amplifiée dans le circuit du collecteur.

(1) Nous affectons de l'indice petit zéro les coordonnées du point de repos.

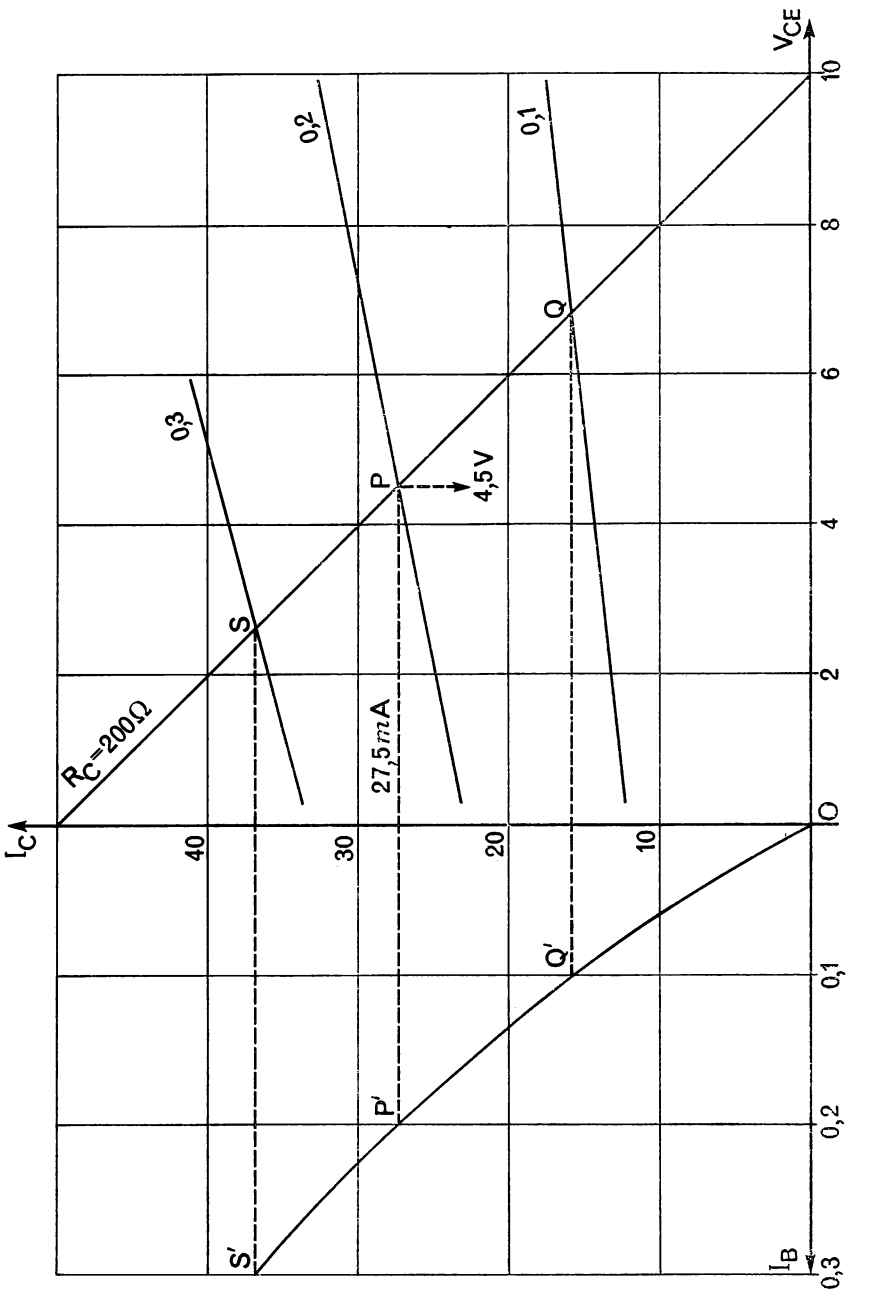


Fig. 213. — *Point de repos et déplacement du point de fonctionnement.*

b) Quand I_B augmente, I_C augmente et V_{CE} diminue.

→ Une augmentation du courant base provoque une augmentation du courant collecteur et une diminution de la tension collecteur.

89. *Formule des petites variations.*

1° **Équation caractéristique.** — Comment I_C varie-t-il quand I_B et V_{CE} varient simultanément? La réponse nous est, à température constante, donnée par la formule 32 *bis* :

$$\textbf{(36)} \qquad \boxed{\Delta I_C = \beta \Delta I_B + \frac{\Delta V_{CE}}{r_s}}$$

Cette formule ne peut être utilisée que pour des variations petites puisque β et r_s varient sensiblement avec la position du point P choisi.

2° **Deuxième relation.** — Quand le point de fonctionnement se déplace sur la droite de charge $I_C = -\frac{V_{CE}}{R_C} + \frac{V_{CC}}{R_C}$ à une variation ΔV_{CE} correspond ΔI_C telle que (V_{CC} = Cte).

$$\textbf{(37)} \qquad \boxed{\Delta I_C = -\frac{\Delta V_{CE}}{R_C}} \ (\text{ou } \Delta V_{CE} = -R_C \Delta I_C)$$

3° **Variation de courant.** — Portons 37 dans 36

$$\Delta I_C = \frac{-R_C \Delta I_C}{r_s} + \beta \Delta I_B$$

soit $r_s \Delta I_C = -R_C \Delta I_C + \beta r_s \Delta I_B$ d'où

$$\textbf{(38)} \qquad \boxed{\Delta I_C = \frac{\beta r_s \Delta I_B}{r_s + R_C}}$$

Remarque. — Cette formule contient β et r_s (variables), elle n'est donc applicable qu'à des petites variations.

A titre d'exercice, essayons de retrouver par le calcul les réslutats graphiques du paragraphes précédent :

Au chapitre 13 nous avons trouvé au voisinage de P (I_B = 0,2 mA

et $V_{CE} = 4{,}5$ V) : pour β, 127 et 118 (p. 184) soit 122 en moyenne et pour $r_s \simeq 1{,}3$ k Ω (p. 187) avec $\Delta I_B = 0{,}2$ mA et $R_C = 0{,}2$ k Ω on trouve :

$$\Delta I_C = \frac{\beta r_s \Delta I_B}{r_s + R_C} = \frac{122 \times 1{,}3 \times 0{,}2}{1{,}3 + 0{,}2} = 21 \text{ mA}$$

et

$$\Delta V_{CE} = - R_C \Delta I_C = - 4{,}2 \text{ V}$$

Ces valeurs sont tout à fait satisfaisantes compte tenu des variations des paramètres.

4° **Variation de tension.** — Reportons la formule (38) dans (37) :

$$\Delta V_{CE} = - R_C \Delta I_C = - \frac{\beta R_C r_s \Delta I_B}{r_s + R_C}$$

soit en divisant par $R_C r_s$:

$$\textbf{(39)} \qquad \boxed{\Delta V_{CE} = - \frac{\beta \Delta I_B}{\dfrac{1}{R_C} + \dfrac{1}{r_s}}}$$

N. B. — Même remarque que pour le courant.

5° **Gain dynamique en courant.** — Le gain dynamique en courant d'un transistor est le rapport de la variation de courant collecteur à la variation de courant base qui l'a produite :

$$A_i = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

avec la formule 38, on obtient :

$$\textbf{(40)} \qquad \boxed{A_i = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{\beta r_s}{r_s + R_C}}$$

Les résistances peuvent être indifféremment exprimées en Ω ou en kΩ. En écrivant $A_i = \beta \times \dfrac{r_s}{r_s + R_C}$ on voit que $A_i < \beta$.

EXEMPLE. — Toujours avec les mêmes valeurs relevées :

a) Lecture sur le réseau : $A_i = \dfrac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \dfrac{21}{0{,}2} = 105.$

b) Calcul : $A_i = \dfrac{\beta r_s}{r_s + R_C} = \dfrac{122 \times 1{,}3}{1{,}3 + 0{,}2} = 106.$

6° **Gain en tension.** — C'est le rapport $A_u = \frac{\Delta V_{CE}}{\Delta V_{BE}}$ avec $\Delta V_{BE} = r_e \Delta I_B$ (formule 33) :

$$A_u = \frac{-R_C \Delta I_C}{r_e \Delta I_B} = -\frac{R_C}{r_e} A_i$$

EXEMPLE. — Au voisinage de $I_B = 0{,}2$ mA on trouve sur la courbe $V_{BE} = f(I_B)$, figure 206, $r_e \simeq 220\ \Omega$ d'où :

$$|A_u| = \frac{200}{220} \times 105 = 95$$

7° **Gain en puissance.** — C'est le produit des deux gains précédents :

$$A_p = |A_u| \times A_i = \frac{R_C}{r_e} \left(\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}\right)^2 = \frac{R_C}{r_e} \times A_i^2$$

EXEMPLE. — Avec $A_i = 105$ et $A_u = 95$ on trouve $A_p \simeq 10\,000$.

90. *Fonctionnement en amplificateur.*

1° Au lieu de faire varier I_B par action sur la tension continue V_{BE}, plaçons en parallèle avec cette source un générateur délivrant un courant alternatif sinusoïdal

$$i_B = I_{Bm} \sin\omega t = I_B \sqrt{2} \sin\omega t$$

i_B est le courant d'entrée. A un instant quelconque, par rapport à la valeur de repos I_{B_0} on peut écrire $\Delta I_B = i_B = I_B \sqrt{2} \sin\omega t$. Les variations de courant base étant sinusoïdales, dans la mesure où l'on peut admettre que β et r_e sont constants, les formules 38 et 39 nous montrent que les variations ΔI_C et ΔV_{CE} du courant et de la tension de sortie seront sinusoïdales aussi. Nous appellerons i_C et v_{CE} ces variations.

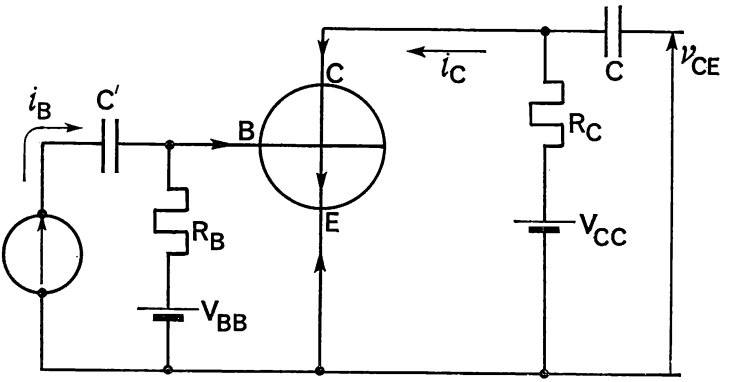
2° Dans le montage (fig. 214), le condensateur C élimine à la sortie la tension continue V_{CE}, le condensateur C′ évite que la source V_{BB} ne débite dans celle d'alternatif et la résistance R_B évite le court-circuitage de cette dernière source.

3° **Déplacement du point de fonctionnement.** — Les valeurs instantanées des trois coordonnées (1) $\mathfrak{I}_B$, $\mathfrak{I}_C$ et $\mathfrak{V}_{CE}$ résultent de la

(1) Nous mettons des lettres rondes pour éviter toute confusion avec les valeurs efficaces notées I_B, I_C, V_{CE}.

superposition des grandeurs continues du point de repos et des grandeurs sinusoïdales dues à i_B. A chaque instant nous avons :

Pour le courant de base : $\mathfrak{I}_B = I_{B0} + i_B$.
Pour le courant de collecteur : $\mathfrak{I}_C = I_{C0} + i_C$.
Pour la tension collecteur-émetteur : $\mathfrak{V}_{CE} = V_{CE0} + v_{CE}$.



Fif. 214. — *Amplification par transistor N P N.*

Appelons I_{Bm}, I_{Cm} et V_{CEm} les valeurs maximales respectives des trois grandeurs ; le point de fonctionnement se déplace sur la droite de charge entre les limites suivantes :

— courant base : $I_{B0} - I_{Bm} \leqslant \mathfrak{I}_B \leqslant I_{B0} + I_{Bm}$
— courant collecteur : $I_{C0} - I_{Cm} \leqslant \mathfrak{I}_C \leqslant I_{C0} + I_{Cm}$
— tension : $V_{CE0} - V_{CEm} \leqslant \mathfrak{V}_{CE} \leqslant V_{CE0} + V_{CEm}$.

En particulier, si $I_{Bm} = 0{,}1$ mA ; le transistor se retrouve dans les conditions du § 88 et le point de fonctionnement « excursionne » entre les points Q et S déjà définis. Nous aurons alors :

$$I_{Cm} = \frac{21}{2} = 10{,}5 \text{ mA} \quad \text{et} \quad V_{CEm} = \frac{4{,}3}{2} = 2{,}15 \text{ V}$$

Notons bien que de part et d'autre du point de repos **les amplitudes de l'excursion sont la moitié des distances QS.**

La figure 215 fait apparaître les valeurs instantanées i_B, i_C et v_{CE}.

4° **Formules.** — Les formules établies pour les petites variations restent valables, elles s'appliquent uniquement aux variations c'est-à-dire

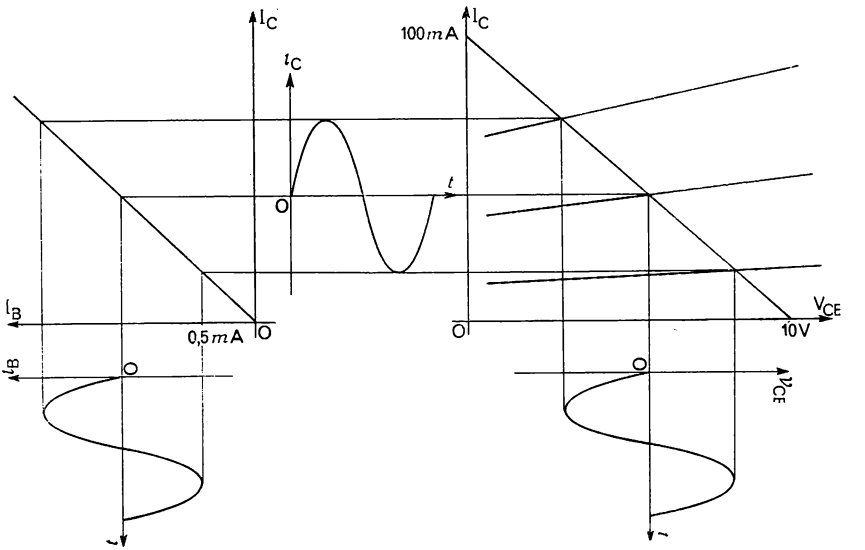


Fig. 215. — *Amplification d'un courant i_B par transistor.*
(Les échelles de courant sont très différentes).

ici aux grandeurs sinusoïdales ; elles sont vraies à chaque instant pour les valeurs instantanées et le restent, en valeurs absolues, pour les valeurs efficaces ou maximales.

a) *Valeurs instantanées :*

— courant collecteur : $$i_C = \frac{\beta r_s i_B}{r_s + R_C}$$

— tension collecteur-émetteur : $$v_{CE} = -\frac{\beta i_B}{\frac{1}{r_s} + \frac{1}{R_C}}$$

b) *Valeurs maximales :*

$$I_{Cm} = \frac{\beta r_s I_{Bm}}{r_s + R_C} \quad \text{et} \quad V_{CEm} = \frac{\beta I_{Bm}}{\frac{1}{r_s} + \frac{1}{R_C}}$$

c) *Valeurs efficaces :*

— courant : **(38 *bis*)** $$\boxed{I_C = \frac{\beta r_s I_B}{r_s + R_C}}$$

— tension : **(39 *bis*)** $\boxed{V_{CE} = \dfrac{\beta I_B}{\dfrac{1}{r_s} + \dfrac{1}{R_C}}}$

d) *Gains :*

— en courant (40 *bis*) $A_i = \dfrac{I_C}{I_B} = \dfrac{\beta r_s}{r_s + R_C}$

— en tension $\boxed{|A_u| = A_i \times \dfrac{R_C}{r_e}}$ en puissance $\boxed{A_p = |A_u| \times A_i}$

91. *Schémas équivalents.*

1° Les grandeurs continues I_{B0} et V_{CC} servent à placer le transistor dans un état correspondant au point de repos mais n'interviennent pas [1] dans les calculs du fonctionnement en amplificateur.

2° Le transistor est équivalent à un alternateur. — La formule (38 *bis*) $I_C = \dfrac{\beta r_s I_B}{r_s + R_C}$ nous invite à considérer le transistor comme un alternateur de force électromotrice efficace $E = \beta r_s I_B$ débitant sur sa résistance interne r_s en série avec la charge R_C (fig. 216).

Le courant efficace débité est bien I_C et la tension efficace de sortie est $V_{CE} = R_C I_C = \dfrac{\beta r_s R_C I_B}{r_s + R_C} = \dfrac{\beta I_B}{\dfrac{1}{R_C} + \dfrac{1}{r_s}}$

Les formules 38 *bis* et 39 *bis* se retrouvent immédiatement sur le schéma, la formule 40 *bis* s'en déduit facilement.

3° Schéma équivalent en source de courant. — La formule $I_C = \dfrac{\beta r_s I_B}{r_s + R_C}$ peut s'écrire $I_C = \beta I_B \times \dfrac{r_s}{r_s + R_C}$, elle nous rappelle la loi des courant dérivés dans deux résistances en parallèle : $I_1 = I \times \dfrac{R_2}{R_2 + R_1}$ (1eTI, F1) et nous suggère de considérer le transistor comme une source débitant le courant efficace βI_B sur sa résistance interne r_s en parallèle avec la charge R_C (fig. 217).

(1) Les valeurs I_{C_0} et V_{CE_0} qui en résultent n'interviennent pas non plus.

Ce schéma nous permet encore de retrouver les formules : par la loi des courants dérivés on a : $I_c = \beta I_B \times \frac{r_s}{r_s + R_c}$, et on en tire facilement V_{CE} et A_i.

Remarque : le courant I′ traversant r_s dans le schéma équivalent est purement fictif [1].

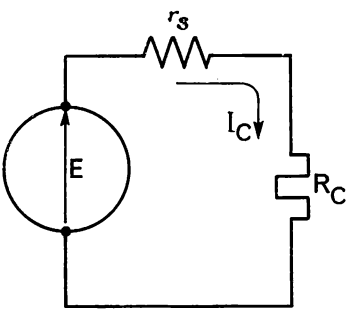


Fig. 216. — *Schéma équivalent en source de tension.*

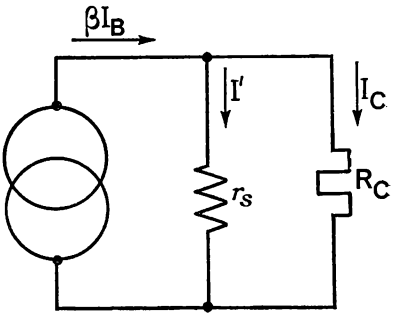


Fig. 217. — *Schéma équivalent en source de courant.*

4° Comparaisons avec le triode.

	F.é.m. DU GÉNÉRATEUR	COURANT	GAIN
TRIODE	μV	$I = \frac{\mu V}{R_i + R_a}$	en tension $\frac{\mu R_a}{R_i + R_a}$
TRANSISTOR. . . .	$\beta r_s I_B$	$I = \frac{\beta r_s I_B}{r_s + R_c}$	En courant $\frac{\beta r_s}{r_s + R_c}$

EXERCICES

AVERTISSEMENT. — Les exercices **14.** 01 à **14.** 09 utilisent le réseau de la fig. 212.

14. 01. — Tracer la droite de charge pour $V_{cc} = 14$ V et $R_c = 200\ \Omega$. Déterminer les coordonnées du point de repos pour $I_{B0} = 0{,}3$ mA [6,9 V et 35,5 mA].

(1) Compléments d'électricité par J. NIARD, Masson et Cie, éditeurs.

14. 02. — Déterminer graphiquement les valeurs maximales de v_{CE} et i_C pour $i_B = 0{,}1 \sin\omega t$ (mA) [2,1 V et 10,5 mA].

14. 03. — La résistance d'entrée étant $r_e = 300\,\Omega$, déterminer les gains en courant, en tension et en puissance avec les résultats du **14.** 02 [105; 70; 7 350].

14. 04. — Déterminer r_s et β au voisinage du point de repos du **14.** 01 [1 330 Ω et 117].

14. 05. — Avec les résultats du **14.** 04, calculer la valeur maximale du courant et de la tension de sortie. Comparer aux résultats graphiques du **14.** 02 [10,2 mA et 2,04 V].

14. 06. — Avec les résultats du **14.** 05, calculer A_i, A_u et A_p [102; 68; 6 736].

14. 07. — Pour la même droite de charge qu'au **14.** 01, on fixe I_{B0} à 0,2 mA. Déterminer β et r_s au voisinage de ce point [125; 2 000 Ω].

14. 08. — Calculer avec le β du **14.** 07 le courant débité par le générateur de courant (fig. 217) pour un courant d'entrée i_B de valeur efficace 0,1 mA [12,5 mA].

14. 09. — Avec le résultat du **14.** 08, calculer le courant efficace dans la charge et la tension efficace de sortie [11,35 mA; 2,27 V].

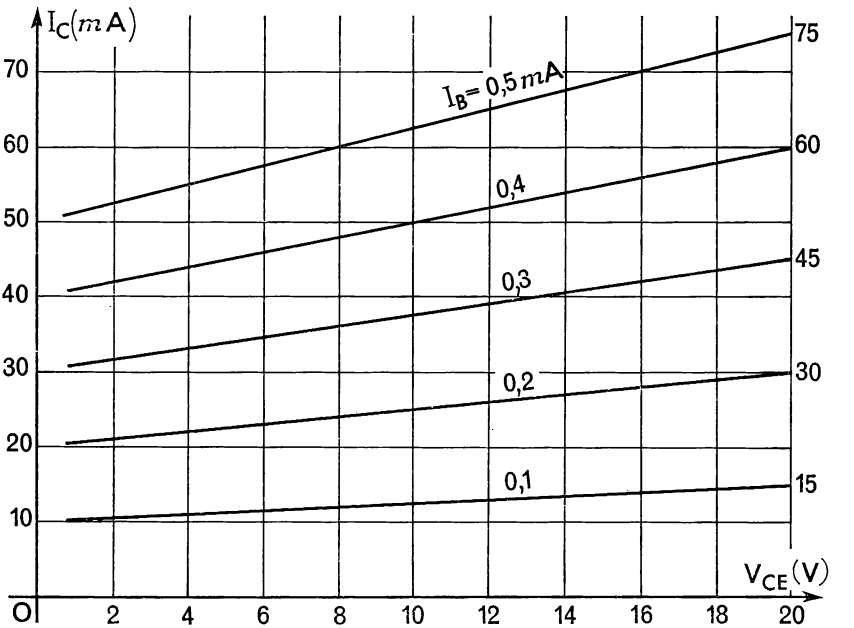


Fig. 212.

PROBLÈMES

I. AVEC SOLUTION.

14. 10. — Le transistor dont le réseau est donné fig. 212 est alimenté entre collecteur et émetteur par une source $V_{CC} = 18$ V en série avec une résistance de charge $R_C = 300\ \Omega$. Le courant de polarisation de la base est $I_{B0} = 0{,}3$ mA.

1° Tracer la droite de charge, donner son équation, placer le point de repos et relever ses coordonnées.

2° On envoie dans la base un courant $i_B = 0{,}2 \sin\omega t$ (mA), placer les points extrêmes de fonctionnement et relever leurs coordonnées.

3° Déterminer avec les relevés du 2° le gain en courant.

4° Évaluer β et r_s au voisinage du point de repos et calculer le gain en courant à l'aide de la formule 40.

— SOLUTION —

1° Équation $I_C = \dfrac{V_{CC}}{R_C} - \dfrac{V_{CE}}{R_C} = \dfrac{18}{0{,}3} - \dfrac{V_{CE}}{0{,}3} = 60 - \dfrac{V_{CE}}{0{,}3}$

Coordonnées de P : $I_{B0} = 0{,}3$ $I_{C0} = 35{,}5$ $V_{CE0} = 7{,}3$.

2° Les points extrêmes sont sur la droite de charge et la caractéristique $I_B = 0{,}5$ pour S et $I_B = 0{,}1$ pour Q.

Leurs coordonnées sont S (2,2 V ; 53,3 mA) et Q (13,85 V ; 13,5 mA).

3° Les distances de S à Q sont en valeurs absolues :

$$\Delta I_C = 39{,}8 \text{ mA et } \Delta V_{CE} = 11{,}65 \text{ V}$$

donc
$$I_{Cm} = 19{,}9 \text{ et } V_{CEm} = 5{,}83$$

$$A_i = \frac{19{,}9}{0{,}2} \simeq 100.$$

4° Au voisinage de P on relève : pour $V_{CE} = 7{,}3$ une distance de $\Delta I_C = 24$ mA entre les caractéristiques 0,2 et 0,4 soit

$$\beta = \frac{24}{0{,}2} = 120$$

sur la caractéristique 0,3 on lit $I_C = 33$ mA pour 4 V et $I_C = 39$ mA pour 12 V d'où :

$$r_s = \frac{12 - 4}{39 - 33} = 1{,}33 \text{ k}\Omega$$

le gain est donc
$$A_i = \frac{\beta r_s}{r_s + R_C} = \frac{120 \times 1{,}33}{1{,}33 + 0{,}3} \simeq 98.$$

II. A RÉSOUDRE.

14. 11. — Un transistor AC 125 (réseaux fig. 202 et 213) est utilisé pour amplifier un courant $i_B = 0{,}1 \sin\omega t$ (mA). La tension continue est $-V_{CC} = 8$ V le courant base de repos est $-I_{B0} = 0{,}2$ mA et la résistance de charge $R_C = 160\ \Omega$.

1° Écrire l'équation de la droite de charge.

2° Placer le point de repos P et les points extrêmes de fonctionnement. Déterminer l'amplitude et la valeur efficace du courant i_C et de la tension v_{CE} de sortie.

3° Déterminer le gain en courant avec les lectures graphiques du 2°.

4° Déterminer β et r_e au voisinage de P.

5° Calculer le gain en courant avec la formule 40 et les résultats du 4°.

14. 12. — Pour différentes valeurs de I_B et de V_{CE} on a relevé le courant de collecteur (mA) d'un transistor :

I_B (µA) / V_{CE} (V)	20	40	60	80	100	120
2	1	2,1	3,1	4,2	5,2	6,2
10	1,5	2,8	4,1	5,5	6,8	8,2

1° Tracer le réseau de sortie en supposant les caractéristiques rectilignes.

2° On polarise le transistor avec un courant de base $I_{B0} = 60$ µA et une tension $V_{CC} = 8$ V. La résistance de charge est $R_C = 1\,000\ \Omega$. Tracer la droite de charge et écrire son équation.

3° Tracer la caractéristique $I_C = f(I_B)$ pour $V_{CE} = 5$ V et la courbe de charge.

4° Relever les coordonnées du point de repos et des points extrêmes de fonctionnement pour un courant i_B de valeur maximale 20 µA.

5° Calculer le gain en courant avec les relevés du 4°.

15

TETRODE – PENTODE

A. — TÉTRODE

92. *But et constitution.*

1° **Les capacités inter-électrodes** du tube triode shuntent partiellement celui-ci quand la fréquence est élevée. De plus la capacité anode-grille reporte sur la grille une fraction des variations de la tension de sortie et réalise ainsi un couplage parasite. Nous allons donc chercher à réduire cette capacité.

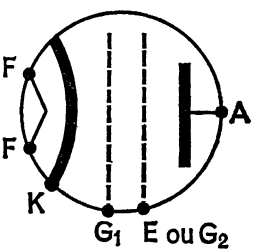


Fig. 218. — *Symbole d'un tube tétrode.*

2° **Grille-écran.** — On interpose entre l'anode et la grille une nouvelle électrode appelée « **grille-écran** » et on lui impose un potentiel constant par rapport à la masse. Cet écran joue un rôle analogue à une cage de Faraday et découple l'anode de la grille. L'écran est noté E ou G_2, la grille devenant G_1 (fig. 218).
Le tube comportant 4 électrodes (le filament n'est pas compté) est appelé **tétrode.**

93. *Réseaux mutuels anode-grille.*

1° **Montage.** — La tension d'écran est une fraction importante de U_b. On l'obtient dans les montages pratiques en réduisant U_b à la valeur convenable avec un potentiomètre (fig. 219) ou en créant une chute de tension dans une résistance d'écran (fig. 220).

Pour le tracé des réseaux, les réglages seront plus souples avec une source d'écran séparé (fig. 221). Les tensions doivent être affichées dans l'ordre suivant : U_f (filament), U_g, U_a et U_e. La suppression doit s'effectuer dans l'ordre inverse.

2° **Caractéristiques mutuelles $I_a = f(U_g)$ pour une tension d'écran constante.** — Elles se tracent en fixant U_e et pour plusieurs valeurs de U_a.

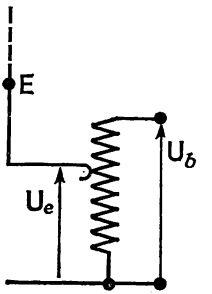


Fig. 219. — *Alimentation de l'écran par potentiomètre.*

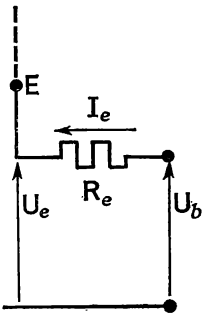


Fig. 220. — *Alimentation de l'écran à travers une résistance.*

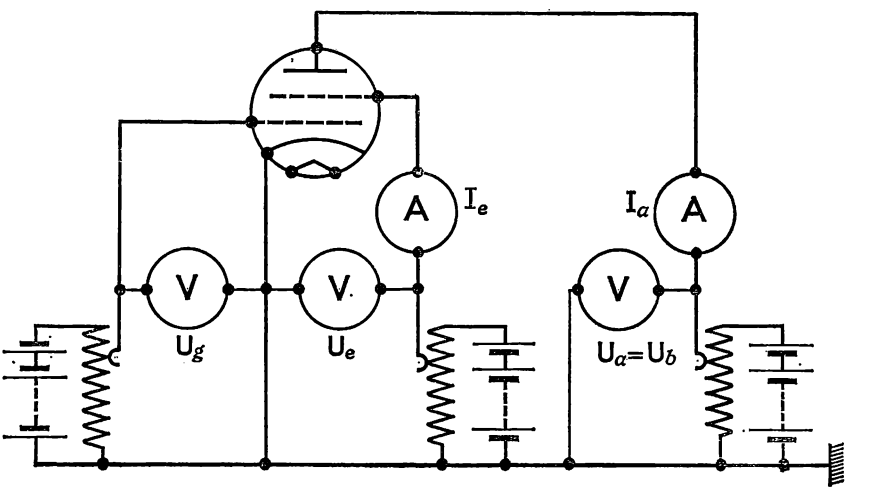


Fig. 221. — *Tracé des caractéristiques du tube tétrode.*

Ces courbes sont presque superposées pour des valeurs de U_a très différentes [1] : **la tension anodique ne commande pratiquement plus le courant anodique** (fig. 222).

(1) Sauf si U_a est plus petit que U_e.

3° **Caractéristiques mutuelles $I_a = f(U_g)$ pour une tension d'anode constante.** — Elles se tracent en fixant U_a et pour plusieurs valeurs de U_e. On retrouve un réseau de courbes analogues aux caractéristiques mutuelles du tube triode (fig. 223) : **dans le tube tétrode c'est l'écran qui commande le courant anodique.**

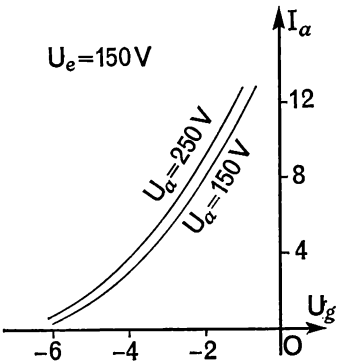
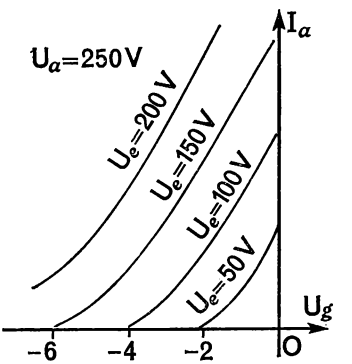


Fig. 222. — *L'influence de la tension anodique est insignifiante.*



Fif. 223. — *La tension d'écran commande le courant anodique.*

Expliquons ce fait. — Le potentiel de l'écran masque celui de l'anode

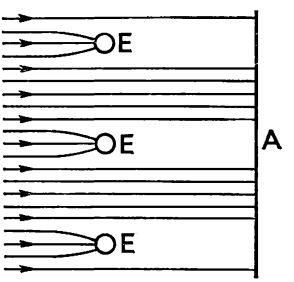


Fig. 224. — *L'écran attire des électrons.*

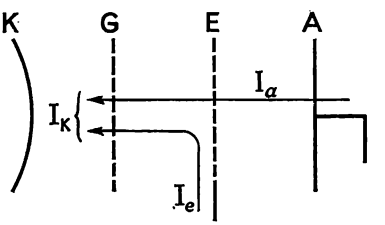


Fig. 225.

et les électrons de la charge d'espace sont sensibles au champ électrique écran-cathode. C'est ce champ qui les accélère ; s'ils arrivent cependant jusqu'à l'anode c'est parce que l'écran n'est pas plein : c'est une « *passoire* » où les trous seraient beaucoup plus gros que les pleins ; cependant une fraction non négligeable des électrons sont attirés par l'écran et s'y arrêtent (fig. 224) : il en résulte un courant écran. Pour $I_a = 10$ mA, I_e atteint 1 ou 2 mA. Le courant émis par la cathode est la somme des deux courants : $I_k = I_a + I_e$ (fig. 225).

94. *Réseau Kellog.*

1° Le montage reste celui de la figure 221. On trace les courbes $I_a = f(U_a)$ pour plusieurs valeurs de U_g et pour $U_e = Cte$.

2° **Allure des caractéristiques.** — Nous relevons I_a et I_e à tension anodique variable pour $U_g = -1$ V et $U_e = 100$ V (fig. 226).

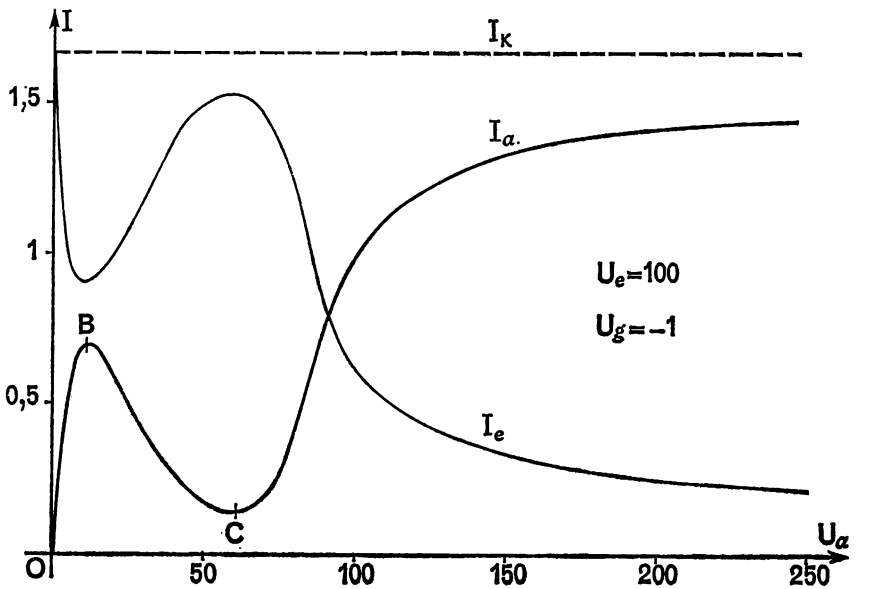


Fig. 226. — *Les courants sont en milliampères.*

Le courant anodique commence par croître puis s'annule presque avant d'augmenter à nouveau et de devenir sensiblement constant pour $U_a > 150$ V. Le courant d'écran suit des variations en sens inverse. On vérifie sans peine que la somme $I_a + I_e = I_k$ est sensiblement constante.

Pour d'autres valeurs des constantes : $U_g = -1{,}5$ V et $U_a = 120$ V on obtient non seulement l'annulation de I_a mais son inversion (fig. 227) : l'anode émet ou renvoie plus d'électrons qu'elle n'en reçoit.

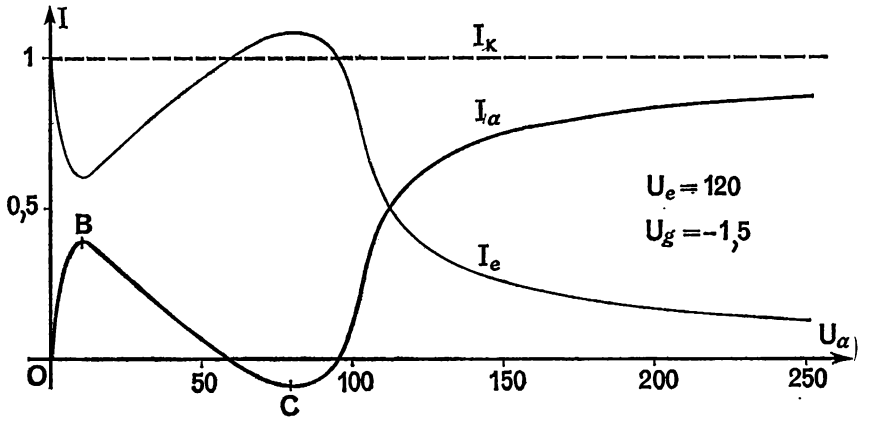


Fig. 227.

95. *Émission secondaire.*

1° **Origine.** — Lorsque les électrons arrivent sur l'anode ils possèdent une énergie $W = \frac{1}{2} mv^2 = eU_a$. Cette énergie est partiellement transformée en chaleur mais le reste peut servir à extraire par choc un ou plusieurs électrons de l'anode métallique : **c'est l'émission secondaire** (chap. 2). Les électrons incidents sont appelés **primaires.**

2° **Variations de l'émission secondaire avec l'énergie des électrons.** — Les valeurs indiquées pour U_a sont celles de la figure 227.

— Quand U_a est petit (< 10 V), l'énergie des électrons primaires est faible et insuffisante pour extraire des électrons secondaires.

— Quand U_a est moyen (10 à 120 V), l'énergie étant suffisante l'extraction d'électrons secondaires va en croissant jusqu'à 80 V puis diminue.

— Quand U_a est grand (> 120 V), l'énergie des électrons primaires est devenue importante et ils pénètrent trop profondément dans le métal pour provoquer l'extraction.

3° **Où vont les électrons secondaires?** — L'énergie des électrons secondaires est assez faible. Tant que l'anode est moins positive que l'écran, ils sont attirés par ce dernier et I_e prend une valeur importante par rapport à I_a. Quand $U_a > U_e$ ils retournent à l'anode et

l'émission secondaire apparente disparaît. Cette disparition résulte donc en fait de deux phénomènes ; la diminution du nombre d'électrons secondaires extraits et le retour de ceux-ci à l'anode. Cependant l'écran continuant d'intercepter des électrons primaires, I_e ne s'annule pas.

4° **Émission secondaire dans le tube triode.** — Tant que la grille est négative les électrons secondaires sont repoussés vers l'anode et l'émission n'apparaît pas.

Si le tube triode fonctionne avec une grille positive, le phénomène se manifeste. C'est l'une des raisons de l'apparition d'un courant grille dans ce cas.

5° **Taux d'émission secondaire.** — C'est le rapport δ du nombre d'électrons secondaires au nombre d'électrons primaires. Quand I_a s'annule c'est que $\delta = 1$, quand I_a devient négatif $\delta > 1$.

6° **Effet dynatron.** — Dans la partie de caractéristique allant de B à C (fig. 226 et 227), à une augmentation de tension anodique correspond une diminution de courant, la résistance interne du tube $R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}$ **est donc négative :** c'est l'effet dynatron.

Sur la figure 227, de B à C on a :

$$\Delta U_a = 70 \text{ V} \quad \Delta I_a = -0{,}46 \text{ mA} \quad R_i = -\frac{70}{0{,}46} \simeq -150 \text{ k}\Omega.$$

96. *Tétrode à faisceaux dirigés.*

1° **Nécessité.** — Le tube tétrode que nous venons d'étudier est inutilisable pour l'amplification. La tension de sortie serait très déformée par rapport à la tension d'entrée. Pour redresser la caractéristique il faut supprimer l'émission secondaire en renvoyant les électrons vers l'anode. Ce résultat est obtenu en créant une barrière de potentiel négative entre l'écran et l'anode.

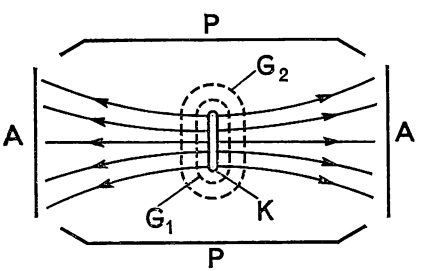


Fig. 228. — *Les plaques P, reliées à la cathode s'opposent à la dispersion des électrons.*

2° **Plaques de déviation.** — Dans le tube tétrode à faisceaux

dirigés on obtient la barrière négative en concentrant le faisceau d'électrons par deux artifices (fig. 228) :

a) La cathode a une forme méplate, l'émission est orientée.

b) Des plaques P reliées à la cathode donc au potentiel zéro interdisent la dispersion des électrons. Le faisceau d'électrons est ainsi très

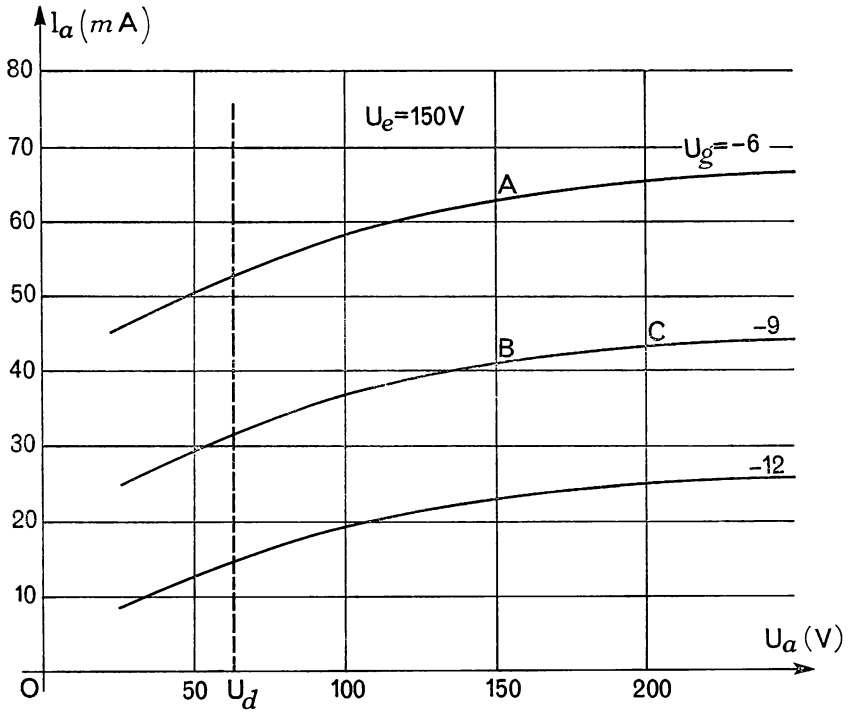


Fig. 229. — *Réseau Kellog d'un tétrode 6 V 6.*

serré et constitue lui-même la barrière négative qui interdit aux électrons secondaires le trajet anode-écran [1] : le faisceau d'électrons primaires joue le rôle d'une **grille négative fictive.**

3° **Caractéristiques.** — a) *Réseau mutuel.* — Il est analogue à celui du tétrode simple. La tension anodique est pratiquement sans influence sur le courant anodique qui est en fait commandé par la tension d'écran.

(1) Comparons à l'impossibilité de se frayer un passage en sens inverse de la marche d'une foule très dense (dans un couloir de métro aux heures d'affluence, par exemple).

b) *Réseau Kellog.* — Il est très différent de celui d'un tube triode (fig. 229). Les caractéristiques sont sensiblement rectilignes dès que la tension anodique dépasse la **tension de déchet U_d.** La partie utile est presque horizontale puisque U_a a peu d'influence sur le courant. A chaque valeur de tension écran correspond un nouveau réseau.

97. *Paramètres d'un tube tétrode.*

1° **Pente.** — Elle est la même que pour un tube triode de même géométrie. Exemple 6V6 (fig. 229) : entre A et B $\Delta U_g = 3$ V.

$$\Delta I_a = 21 \text{ mA} \qquad p = \frac{21}{3} = 7 \text{ mA/V}$$

2° **Résistance interne.** — La présence de l'écran a augmenté R_i. Sur le réseau (fig. 229), entre B et C on a :

$$\Delta U_a = 50 \text{ V} \qquad \Delta I_a = 2 \text{ mA} \Rightarrow R_i = 25\,000\ \Omega$$

3° **Facteur d'amplification.** — Par rapport à un tube triode il a augmenté dans la même proportion que R_i. Pour le 6V6 :

$$\mu = pR_i = 7 \times 25 = 175$$

B. — PENTODE

98. *Constitution et réseaux.*

1° Pour renvoyer à l'anode les électrons secondaires on place entre A et G_2 une **grille d'arrêt G_3** reliée à la cathode, donc au potentiel zéro (fig. 230). La barrière de potentiel qu'elle constitue est traversée par les électrons primaires rapides de grande énergie mais ne l'est pas par les électrons secondaires lents et de faible énergie.

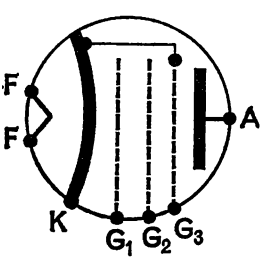


Fig. 230. — *Symbole d'un tube pentode avec connexion interne entre K et G_3.*

2° **Montage.** — Il est identique à celui du tube tétrode. La seule différence est la présence de G_3 et sa liaison à la cathode qui, en général, est effectuée à l'intérieur du tube lors de sa fabrication.

3° **Réseau mutuel.** — Il est analogue à celui du tétrode. Comme dans celui-ci le courant anodique est commandé par la tension d'écran. Nous renvoyons aux figures 222 et 223.

4° **Réseau Kellog.** — Les caractéristiques sont presque parallèles à l'axe des tensions (fig. 231). Elles peuvent se déduire l'une de l'autre

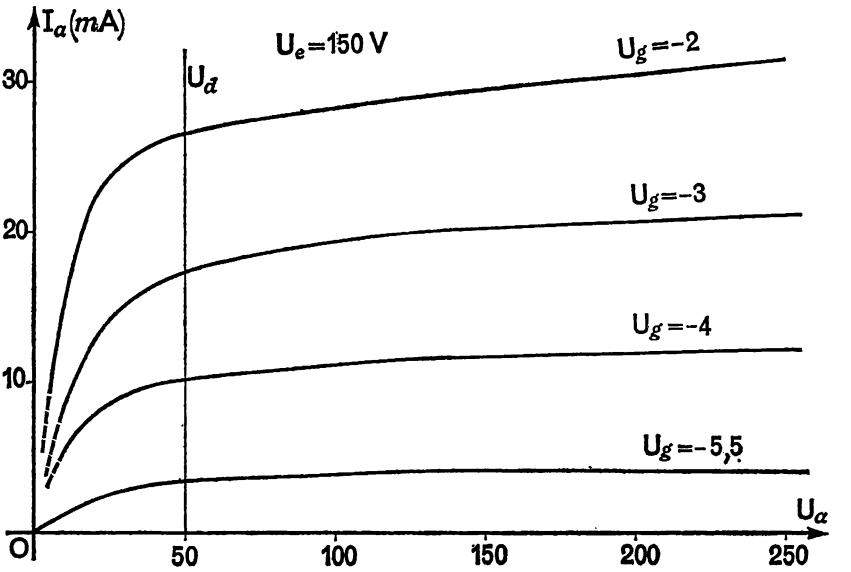


Fig. 231. — *Réseau Kellog du tube EL 83.*

par une translation parallèle à l'axe des courants. Calculons R_i sur 2 courbes :

a) Sur $U_g = -2$ V

$$\text{de 50 à 250 V} \begin{cases} \Delta U_a = 200 \text{ V} \\ \Delta I_a = 5 \text{ mA} \end{cases} \Rightarrow R_i = \frac{200}{5} = 40 \text{ k}\Omega$$

b) Sur $U_g = -5{,}5$ V

$$\text{de 50 à 250 V} \begin{cases} \Delta U_a = 200 \text{ V} \\ \Delta I_a = 0{,}67 \text{ mA} \end{cases} \Rightarrow R_i = \frac{200}{0{,}67} = 300 \text{ k}\Omega.$$

5° **Limites du tube.** — a) *Tension de déchet.* — A gauche de la tension de déchet U_d les caractéristiques ne sont plus du tout rectilignes. On doit renoncer à utiliser le tube pour $U_a < U_d$.

b) Les autres limites I_{km}, U_{am} et P_{am} se placent sur le réseau comme pour un tube triode. Bien noter que l'on a $I_k = I_a + I_e$ et que par conséquent c'est la somme des deux courants d'anode et d'écran qui fixe la limite pour la cathode.

99. *Paramètres.*

1° **Pente.** — Identique à celle d'un tube triode de même géométrie, elle est de quelques mA/V.

2° **Résistance interne.** — Encore plus élevée que pour le tétrode, elle atteint et dépasse même le mégohm pour certains tubes.

3° **Facteur d'amplification.** — Il est très élevé, pour 4 mA/V et 1 MΩ (1 000 $k\Omega$) on trouve : $\mu = 4 \times 1\,000 = 4\,000$.

100. *Fonctionnement en charge.*

1° **Courbes de charge.** — Le tube tétrode et le tube pentode ont les mêmes fonctions que le tube triode : **ce sont des triodes dont les performances sont améliorées.** Leurs courbes en charge se construisent donc de la même façon.

En particulier l'équation de la droite de charge est toujours :

$$I_a = -\frac{U_a}{R_a} + \frac{U_b}{R_a}$$

2° **Formules.** — Les formules du tube triode sont applicables sans restriction. Cependant, surtout pour le pentode, la résistance de charge R_a est le plus souvent négligeable devant la résistance interne R_i : $R_a \ll R_i$, les formules peuvent donc être simplifiées.

a) *Courant :* $$i = \frac{\mu v}{R_i + R_a} \simeq \frac{\mu v}{R_i} = pv.$$

(41) $\boxed{i = pv}$ $\left\{\begin{array}{l} v \text{ en volts} \\ p \text{ en mA/V} \\ i \text{ en mA} \end{array}\right.$

b) *Tension :* $$u = -\frac{\mu R_a v}{R_i + R_a} \simeq -\frac{\mu R_a v}{R_i} = -pR_a v.$$

c) *Gain :* $A = -\frac{\mu R_a}{R_i + R_a} \simeq -\frac{\mu R_a}{R_i} = -pR_a.$

(42) $\boxed{A = -pR_a}$

Le gain est proportionnel à R_a tant que celle-ci est négligeable devant R_i.

d) *Pente dynamique :* $p' = \frac{\mu}{R_i + R_a} \simeq \frac{\mu}{R_i} = p.$

Dans un tube pentode, tant que R_a est négligeable devant R_i la pente dynamique est constante et égale à la pente statique.

EXERCICES

Nous donnons un tableau de valeurs correspondant au réseau de la fig. 231. Les caractéristiques seront supposées rectilignes (I_a en mA).

U_a \ U_g	— 5,5	— 4	— 3	— 2
50	3,33	10	17,5	26,5
250	4	12	22	31,5

15. 01. — Déterminer la résistance interne du tube EL 83 (fig. 231) sur la courbe $U_g = -4$ V [100 kΩ].

15. 02. — Déterminer la pente du tube EL 83 pour $U_a = 250$ V et entre les valeurs — 4 et — 5,5 de U_g [5,3 mA/V].

15. 03. — Tracer la droite de charge du tube EL 83 pour $U_b = 250$ V et $R_a = 10$ kΩ. Écrire son équation [$I_a = -\frac{U_a}{10} + 25$].

15. 04. — Quelles sont les coordonnées du point de repos de l'exercice **15.** 03 pour $U_g = -4$ V? [140 V; 11 mA].

15. 05. — Déterminer graphiquement pour les données de l'exercice **15.** 03, les valeurs maximales du courant et de la tension de sortie si $U_{go} = -4{,}25$ V et pour une valeur maximale de tension d'entrée égale à 1,25 V [7 mA; 72 V].

15. 06. — Calculer le gain du tube avec les résultats précédents [— 57,6].

15. 07. — Calculer le gain du tube EL 83 avec $p = 5{,}3$ et $R_a = 10\ k\Omega$ [— 53].

15. 08. — Calculer avec la formule 41 les valeurs maximale et efficace du courant alternatif du tube EL 83 pour $v = 1{,}25 \sin\omega t$ et $p = 5{,}3$ mA/V [6,6 et 4,7].

15. 09. — Placer sur le réseau du tube EL 83 l'hyperbole de dissipation maximale $P_{am} = 3$ W.

15. 10. — Tracer les caractéristiques du réseau mutuel du tube EL 83 pour les valeurs suivantes de U_a : 50-100-150-200-250. Que constate-t-on?

15. 11. — Un tube pentode a une résistance interne de 500 kΩ et une pente de 6 mA/V. Calculer avec la formule exacte, le gain pour les valeurs suivantes de R_a ($k\Omega$) : 10-20-30-40-50-100. Comparer les résultats à la valeur approchée $A = -pR_a$.

15. 12. — Avec les données précédentes calculer la pente dynamique avec la formule exacte. Comparer à la valeur approchée.

16

PHANOTRON (DIODE A GAZ)

101. *Étude expérimentale.*

1° **Description.** — *a*) Le tube diode à gaz ou phanotron est un tube en verre dans lequel on a fait le vide avant d'y introduire soit un gaz rare de l'air soit quelques gouttes de mercure qui s'y vaporise par-

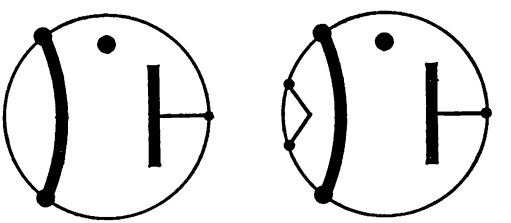


Fig. 232. — *Symboles d'un phanotron.*

tiellement. La pression, en fonctionnement, y atteint 10^{-2} à 10^{-1} mm de mercure. Le tube possède deux électrodes : une anode et une cathode. Le chauffage y est direct ou indirect (fig. 232).

b) La cathode a une surface émissive plus grande que dans les tubes à vide (fig. 233), le courant anodique atteint une centaine d'ampères pour les plus gros phanotrons.

Fig. 223. — *Cathode à grande surface émissive.*

c) L'anode est en nickel ou en graphite, elle est souvent placée au-dessus de la cathode. Les tubes à vapeur de mercure doivent fonctionner verticalement.

2° **Montage.** — L'alimentation du filament n'est pas représentée. La résistance R_a est destinée à protéger le tube après amorçage (fig. 234).

3° **Caractéristique $I_a = f(U_a)$.** — Elle est tracée (fig. 235) avec un tube AX 50 à vapeur de mercure : chauffage 4 V ; 3,75 A, courant

maximal 275 mA. Tension maximale inverse 500 V. On y distingue trois parties :

a) *De 0 à A.* — La tension est plus petite que 10 V, le courant très faible est du même ordre que dans un tube à vide, quelques milliampères. C'est le régime sombre.

b) *Partie ABC.* — Portons la tension à 10,6 V, le courant croît lentement jusqu'à B puis rapidement jusqu'en C (100 mA) alors que la tension décroît spontanément entre les bornes du tube ; en outre le tube s'illumine : il s'amorce.

c) *Au delà de C.* — Augmentons à nouveau la tension à partir de 9 V (abscisse de C), le courant croît très rapidement et atteint 200 mA pour 9,4 V soit 100 mA d'augmentation pour $\Delta U_a = 0{,}4$ V. Le tube est en régime luminescent.

4° **Rôle de R_a.** — Si l'on supprime R_a, il faut régler à $U_b = 10{,}6$ V la tension de la source pour amorcer. A partir de l'amorçage et sans qu'il soit nécessaire de retoucher U_b le courant augmentera dans le tube jusqu'à la valeur de I_a correspondant à $U_a = 10{,}6$ V sur la droite Cz. Par extrapolation on trouve $I_a = 100 + 100 \times \dfrac{1{,}6}{0{,}4} = 500$ mA. Le tube dont le courant maximal est 275 mA serait détérioré.

5° **Régime d'arc.** — Si l'on appliquait au tube une tension élevée un arc s'amorcerait entre les électrodes et produirait leur destruction.

6° **Phénomènes accompagnant l'amorçage.**

a) Apparition d'une lueur.

b) Brusque augmentation du courant.

c) Nette diminution de la tension.

7° **Tensions caractéristiques du tube.**

a) Tension d'amorçage : $U_{am} = 10{,}6$ V.

b) Tension d'arc : c'est la tension qui entretient le courant après amorçage : $U_a = 9$ V.

c) Tension d'extinction : le tube s'éteint si l'on abaisse la tension un peu au-dessous de U_a.

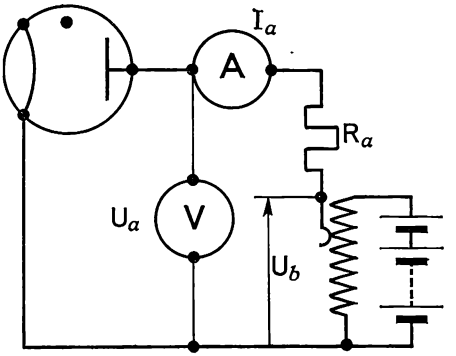


Fig. 234. — *Montage.*

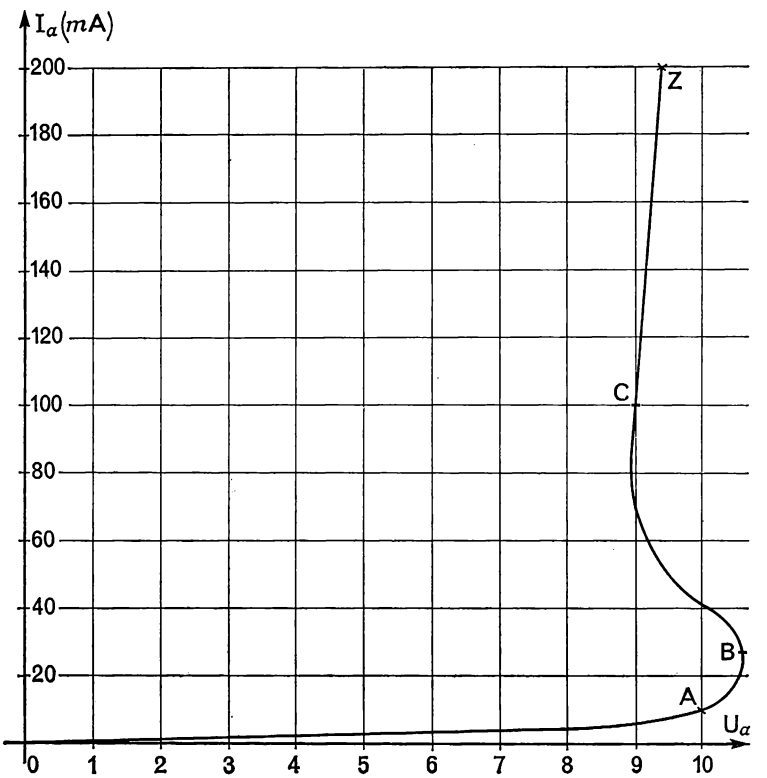


Fig. 235. — *Caractéristique du phanotron AX 50.*

8° **Résistance interne du tube.** — C'est l'inverse de la pente [1] de la partie rectiligne : $R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}$

pour le tube AX 50 : $R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{0,4}{0,10} = 4\ \Omega$.

Elle est beaucoup plus faible pour les gros phanotrons et en général négligée.

102. *Ionisation des gaz.*

1° **Ionisation par choc.** — Lorsqu'un électron, doué d'une énergie suffisante, heurte une molécule gazeuse il est susceptible de l'ioniser. L'ionisation arrache un électron de la molécule, la partie restante est un ion positif (fig. 236). Rappelons que pour les gaz rares et les vapeurs métalliques la molécule est monoatomique.

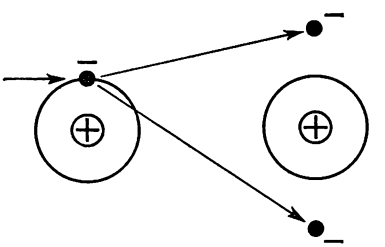


Fig. 236. — *Ionisation.*

2° **Énergie d'ionisation.** — C'est l'énergie W_i qu'il faut fournir à un électron pour lui faire quitter définitivement l'atome. Rappelons quelques valeurs du tableau de la page 14 :

mercure 10,4 eV ; argon 15,7 eV ; néon 21,5 eV

Le potentiel d'ionisation V_i s'exprime par le même nombre : 10,4 V pour Hg. On s'explique maintenant l'amorçage du phanotron tant que $U < 10,4$ V, l'énergie de l'électron est insuffisante ; à partir de cette valeur l'ionisation est possible et devient cumulative, certains électrons éjectés ont assez d'énergie pour ioniser un nouvel atome.

Le potentiel d'ionisation varie bien sûr, avec la nature du gaz mais aussi avec la pression et la distance des électrodes.

3° **Pression nécessaire à l'ionisation.** — Il ne peut y avoir d'ionisation par choc que s'il y a possibilité de chocs. Le libre parcours moyen d'un électron doit être nettement plus faible que la distance

(1) Voir page 102.

inter-électrodes. Le L. P. M. d'un électron au milieu de molécules est égal à $4\sqrt{2}$ fois celui d'une de ces molécules soit :

$$l' = \frac{4}{\pi n d_a^2}$$

Pour le mercure à la pression de 10^{-2} mm on trouve $l' = 9{,}4$ mm. Si la distance entre les électrodes est 10 mm il y a en moyenne un choc sur le parcours. Avec $p = 10^{-1}$ mm de Hg, $l' = 0{,}94$ mm et il y a une dizaine de chocs.

4° **Ionisation par degrés.** — Pourquoi le tube étudié fonctionne-t-il avec une tension de 9 V inférieure à V_i ? Notons que ce fonctionnement n'est possible qu'après l'amorçage à $U_{am} \geqslant V_i$. L'ionisation dans le tube se produit alors par degrés, en deux temps par exemple :

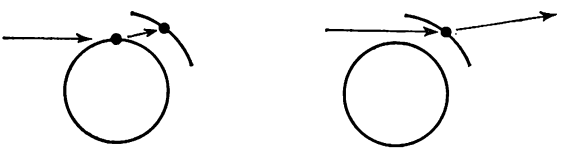


Fig. 237. — *Le premier choc excite, le second ionise.*

dans un premier choc l'atome est **excité** et un électron se trouve porté sur un niveau extérieur au sien, si un nouvel électron incident vient immédiatement produire un second choc, il peut y avoir ionisation (fig. 237), il suffit que la somme des énergies apportées en deux fois soit supérieure à 10,4 eV.

5° **Origine de la lumière.** — Pendant le fonctionnement il existe d'une part des ions qui reconstituent des atomes avec des électrons rencontrés et d'autre part des atomes excités qui reviennent à leur état normal. Ces deux opérations se font avec restitution d'énergie sous forme de radiations lumineuses ou non. Dans le cas du mercure la longueur d'onde seuil est $\lambda_s = \dfrac{1{,}24}{10{,}4} = 0{,}12$ µm, la radiation correspondante se trouve dans l'ultra-violet.

→ Outre la lumière bleue visible, les tubes à vapeur de mercure rayonnent des UV dangereux pour la vue.

6° **Ionisation par radiations.** — Les radiations cosmiques, les rayons γ, X et UV ionisent partiellement les gaz qu'ils traversent. Cette ionisation préalable favorise l'amorçage.

7° **Désionisation.** — Après la suppression de la tension anodique le tube se désionise par recombinaison des ions et des électrons. Cette opération n'est pas instantanée, elle dure plusieurs centaines de microsecondes et interdit l'usage du tube à des fréquences supérieures à 1 000 Hz. L'ionisation est plus rapide : quelques microsecondes.

103. *Nature du courant dans les gaz.*

1° **Émission cathodique.** — La loi de Child-Langmuir reste valable $I_a = GU_a^{3/2}$.

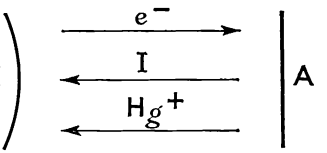


Fig. 238. — *Double déplacement de charges.*

2° **Existence d'un double courant.** — *a*) Comme dans l'électrolyse, il y a double circulation de charges :

— Les électrons négatifs, légers et rapides, vont de la cathode vers l'anode et équivalent à un courant de sens contraire.

— Les ions positifs, lourds et lents, vont de l'anode à la cathode (fig. 238).

b) *Vitesses.* — La même énergie est fournie aux deux types de porteurs de charges :

$$eU = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1^2.$$

Le rapport des vitesses de déplacement est donc :

$$\frac{v}{v_1} = \sqrt{\frac{m_1}{m}}$$

Pour simplifier le calcul, comparons les masses à celle de l'atome d'hydrogène :

pour l'électron : $m = \frac{1}{1\,840}$ et pour le mercure : $m_1 = 201$.

$$\frac{v}{v_1} = \sqrt{201 \times 1\,840} = 610$$

Comme il existe à peu près autant d'électrons [1] que d'ions Hg^+ le courant est dû pour $\frac{610}{611}$ aux électrons et pour $\frac{1}{611}$ aux ions. Pratiquement le courant est purement électronique.

(1) Il y a même un peu plus d'électrons.

3° **Rôle des ions positifs.** — Bien que ne participant pas directement au courant, les ions positifs ont un rôle important : **ils neutralisent la charge d'espace** et facilitent ainsi la sortie de nouveaux électrons de la cathode : grâce à eux le courant peut atteindre des valeurs importantes.

4° **Inconvénients des ions positifs.** — Ils bombardent la cathode et provoqueraient sa « désintégration » si leur énergie eU_a devenait trop grande. Cette circonstance pourrait se produire si le tube était mis en service sans chauffage de cathode ou avec chauffage insuffisant : la durée de **préchauffage** indiquée par le constructeur doit être respectée ; elle peut atteindre plusieurs minutes.

104. *Usage en redresseur.*

1° **Rôle redresseur.** — La cathode étant seule émissive, le courant dans un phanotron ne peut avoir qu'un seul sens : le tube est un redresseur.

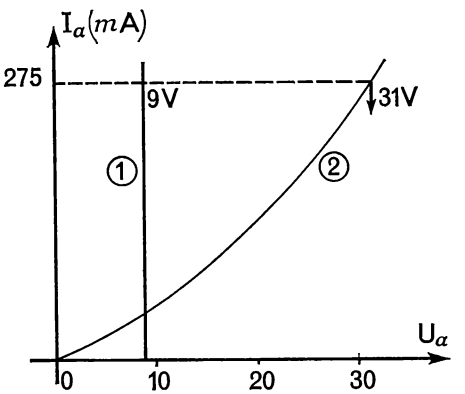


Fig. 239.

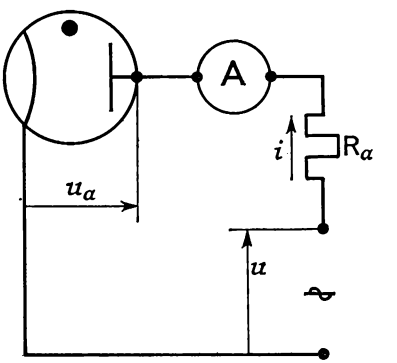


Fig. 240. — *Redressement.*

2° **Comparaison avec le tube à vide.** — Pour le redressement le tube à gaz présente des avantages :

— La résistance interne est toujours négligeable.

— La chute de tension est faible et constante : c'est la tension d'arc au plus égale à U_a.

La figure 239 représente les caractéristiques simplifiées du tube

à gaz AX 50 (courbe 1) et du tube à vide GZ 32 (courbe 2). Pour le courant de 275 mA (courant nominal des deux tubes), les chutes de tension sont respectivement 9 V et 31 V.

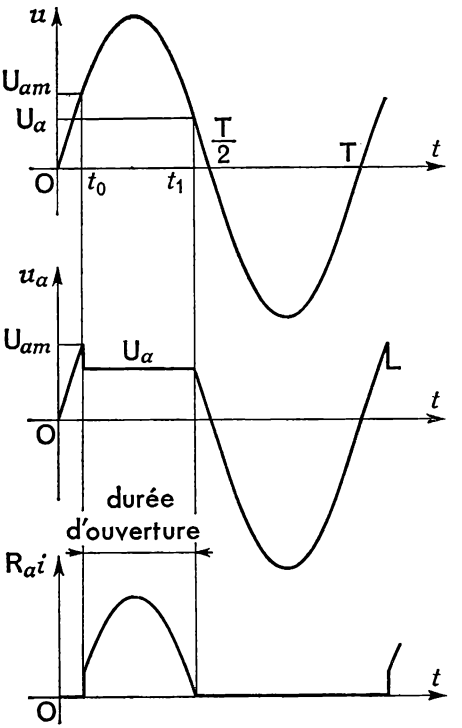


Fig. 241. — De haut en bas : *tension sinusoïdale, tension entre les bornes du tube, tension de la charge.*

3° **Redressement monoalternance.** — Le tube est en série avec la source et la charge (fig. 240). La loi d'Ohm appliquée au circuit donne :

$$u = u_a + R_a i$$

a) *Alternance négative :* $u < 0$, le tube ne conduit pas et le courant est nul :

$$i = 0 \Rightarrow u = u_a$$

toute la tension inverse se retrouve entre les bornes du tube.

b) *Alternance positive: b1)* $u < U_{am}$, le tube n'est pas amorcé, le courant est nul : $i = 0$ et $u = u_a$.

b2) A l'instant t_0 (fig. 241) : $u = U_{am}$ le tube s'amorce et sa tension tombe à la valeur U_a, le courant passe de zéro à

$$i = \frac{U_{am} - U_a}{R_a}$$

b3) A partir de l'instant t_0 : $u > U_{am}$, le tube est amorcé et la tension entre ses bornes reste pratiquement égale à la tension d'arc U_a :

$$u_a = U_a \quad \text{et} \quad i = \frac{u - U_a}{R_a}$$

b4) A l'instant t_1 : $u = U_a$. Le tube se désamorce et i devient nul.

La durée de fonctionnement par période (de t_0 à t_1), appelée **durée d'ouverture,** est inférieure à la demi-période (fig. 241).

4° **Fonctionnement pratique.** — La différence entre U_{am} et U_a (1 à 2 V) est pratiquement négligeable dès que la valeur maximale U_m

de la tension alternative dépasse une vingtaine de volts et le graphe de u_a peut être simplifié (fig. 242).

Si la tension U_m est grande, la durée d'ouverture est pratiquement la demi-période (fig. 243) et en première approximation on pourra négliger la tension d'arc : $U_a \ll U_m$.

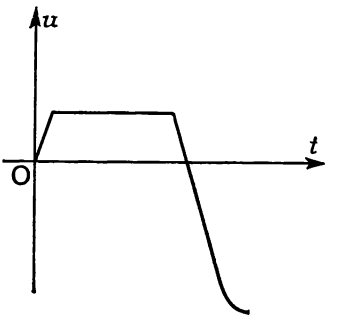


Fig. 242.

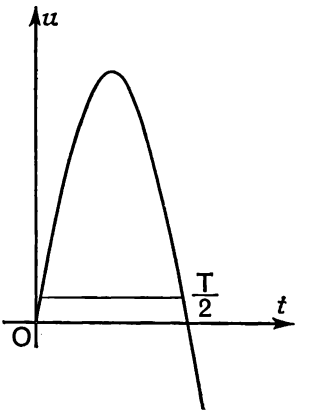


Fig. 243.

105. *Autres tubes à gaz.*

1° **Phanotrons.** — Nous avons construit notre étude autour d'un petit tube à mercure, il en existe d'autres :

— Ils peuvent être à gaz rares avec souvent une goutte de mercure pour faciliter l'amorçage.

— Le courant redressé peut atteindre une centaine d'ampères sous plusieurs centaines de volts.

Aujourd'hui ils sont avantageusement remplacés par des tubes à cathodes liquides ou par des redresseurs à jonction.

2° **Autres tubes redresseurs.** — Ils seront étudiés dans le fascicule « électronique », classe BTn.

3° **Tubes à cathode froide.** — Ce sont de petits tubes, le plus souvent au néon employés comme veilleuses ou comme stabilisateurs de tension. La chute de tension n'y dépend que de la distance des électrodes, pour un tube donné elle est donc indépendante du courant. Montés

comme l'indique la figure 244, ils donneront entre leurs bornes une tension U_2 constante, les variations de U_1 étant absorbées par la chute de tension dans R.

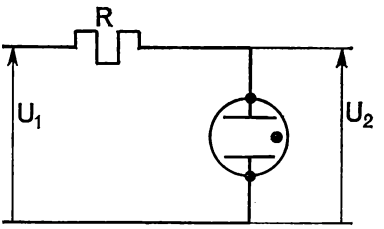


Fig. 244. — *Stabilisation de tension.*

4° **Tubes luminescents.** — Ce sont les tubes d'éclairage publicitaires. Ils fonctionnent en alternatif et nécessitent des tensions de 600 à 800 V par mètre de longueur. Leur couleur dépend du gaz de remplissage : rose pour l'hélium, rouge orangé pour le néon, bleue pour le gaz carbonique, jaune pour l'azote.

5° **Tubes fluorescents.** — Ce sont des tubes à vapeur de mercure, la décharge produit des radiations ultra-violettes qui excitent les substances fluorescentes dont la paroi interne du verre est recouverte. Par mélange de ces substances on peut obtenir un éclairage se rapprochant de la lumière naturelle. Ces tubes fonctionnent sous les tensions domestiques (220 V) mais nécessitent un dispositif d'allumage (starter).

6° **Lampes à vapeur de sodium.** — Elles donnent une lumière jaune et sont utilisées pour l'éclairage public.

7° **Lampes à vapeur de mercure.** — Elles donnent une lumière bleutée, elles sont utilisées pour l'éclairage public. L'ultra-violet qu'elles produisent les font employer pour la reproduction de documents (tirages semi-humides).

8° **Arc électrique.** — C'est une source de lumière intense précieuse en cinématographie : éclairage des prises de vue et projection. L'arc est produit à l'air libre, les deux électrodes d'abord en contact sont écartées à quelques millimètres l'une de l'autre : un arc jaillit dans l'air ionisé.

EXERCICES

16. 01. — La tension d'amorçage d'un phanotron est 15 V. Peut-il s'amorcer quand il est alimenté par une tension alternative de valeur efficace U = 8 V? Quelle est la valeur minimale de U qui permet l'amorçage? [10,6 V].

16. 02. — Tracer la sinusoïde $u = 20 \sin\omega t$ puis la courbe de la tension u_a entre les bornes d'un phanotron qui chute 9 V et s'amorce à 11 V.

16. 03. — Tracer la courbe de la tension entre les bornes de la résistance de charge du tube précédent, puis graduer cette courbe en ampères pour $R_a = 5\ \Omega$. Quelle valeur maximale le courant atteint-il? [2,2 A].

16. 04. — On redresse en monoalternance une tension $u = 120\sqrt{2}\sin\omega t$ calculer U_{moy} en négligeant la tension d'arc U_a [54 V].

PROBLÈMES

I. AVEC SOLUTION.

16. 05. — Un phanotron dont la tension d'amorçage est 12 V et la tension d'arc 9 V est utilisé au redressement monoalternance d'une tension $u = 30 \sin 100\ \pi t$. La résistance de charge est 10 Ω.

1° Tracer en fonction du temps les courbes de la tension alternative, de la tension entre les bornes du tube et de la tension de la charge.

2° Déterminer par le calcul l'instant d'amorçage et celui de désamorçage puis la durée d'ouverture.

3° Déterminer le courant : *a*) à l'amorçage; *b*) quand il est maximal; *c*) à l'instant du désamorçage.

— SOLUTION —

1° Figure 245.

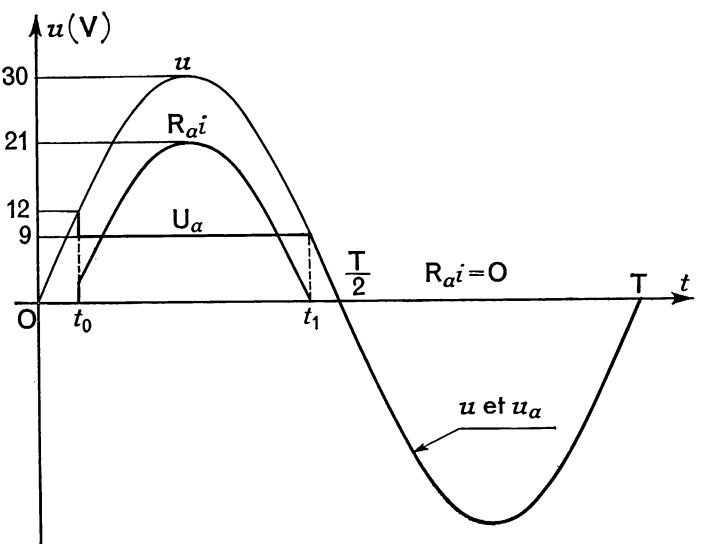


Fig. 245.

2° L'amorçage a lieu quand $u = U_{am}$ et $0 < \omega t_0 < \frac{\pi}{2}$ $12 = 30 \sin \omega t_0$ soit $\sin \omega t_0 = 0{,}4 \rightarrow \omega t_0 = 0{,}412\ rd$ $t_0 = \frac{0{,}412}{100\pi} = 1{,}31$ ms et comme $T = \frac{1}{50}\ s = 20$ ms

$$t_0 = \frac{1{,}31}{20} T = 0{,}065\ T$$

Le désamorçage se produit pour $U_a = u$ et $\frac{\pi}{2} < \omega t_1 < \pi$ $\sin \omega t_1 = 0{,}3$ soit $\omega t_1 = 2{,}84\ rd \Rightarrow t_1 = \frac{2{,}84}{100\pi} = 9{,}04$ ms.

Durée d'ouverture : $t_1 - t_0 = 9{,}04 - 1{,}31 = 7{,}73$ ms, soit puisque $\frac{T}{2} = 10$ ms, 77 % de la demi-période.

3° *a*) Quand le tube s'amorce $u = 12$ V et la tension du tube tombe à 9 V.

$$i = \frac{12 - 9}{10} = 0{,}3\ \text{A}.$$

b) $U_m = 30$ V $U_a = 9$ V $i = \frac{30 - 9}{10} = 2{,}1$ A.

c) Le désamorçage et l'annulation du courant sont simultanés.

II. A RÉSOUDRE.

16. 06. — Un tube stabilisateur de tension fonctionne à tension constante $U = 100$ V pour un courant compris entre 10 et 50 mA. Il est monté en série avec une résistance de 500 Ω (fig. 155). Calculer les valeurs limites que peut prendre la tension U_1.

16. 07. — La caractéristique d'un phanotron peut être simplifiée : $U_{am} = U_a = 10$ V; $R_i = 0$. Déterminer, en fonction de la période, la durée d'ouverture quand il redresse une tension sinusoïdale, $f = 50$ Hz, pour les valeurs efficaces suivantes (V) : 10; 14,14; 20; 50; 100.

Achevé d'imprimer sur les presses de
FD - IMPRIMERIE ALENÇONNAISE
Rue Édouard-Belin - B.P. 57
61-Alençon, France
N° d'Éditeur Tc 18652 (PF. c. VII)
Dépôt légal : 2e trimestre 1974
Imprimé en France

181433